



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Aplicación de *Opuntia ficus - indica* (Nopal) como coagulante natural para la biorremediación de aguas residuales: Revisión sistemática.

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Santisteban Tineo, Eleazar Nilver (ORCID: 0000-0002-5437-3836)

ASESOR:

Mg. Garzón Flores Alcides (ORCID: 0000-0002-0218-8743)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y gestión de recursos naturales.

CHICLAYO – PERÚ

2020

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres Celso Santisteban y María Tineo por el gran esfuerzo que han realizado, en diferentes aspectos, durante mi formación para que pudiera llegar hasta este momento. A mi tía Deysi Tineo y a mi hermano menor por estar siempre presentes, y el constante apoyo moral e incondicional que siempre me han otorgado. Finalmente, quienes descansaron eternamente con la esperanza de verme convertido en un buen profesional.

Esto es por y para ustedes.

Agradecimiento

Agradezco a Dios, quien me guía en todo momento y me permitirme disfrutar de salud, tranquilidad, y por darme fuerzas para poder superar los obstáculos que se me presentaron.

A la Universidad César Vallejo que me albergó durante la última etapa de mi carrera profesional, a todos los docentes que he tenido a lo largo de la misma, de lo que he recibido conocimientos que servirán para mi vida profesional.

A mi asesor Alcides Garzón Flores quien me orientó con sapiencia y perseverancia para elaborar correctamente mi tesis.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	12
3.1. Tipo y diseño de investigación.	12
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística.	12
3.3. Escenario de estudio.	14
3.4. Participantes.	14
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	14
3.6. Procedimiento.	15
3.7. Rigor científico.	17
3.8. Método de análisis de datos.	19
3.9. Aspectos éticos.	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
V. CONCLUSIONES	44
VI. RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS	46

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Taxonomía OFI.</i>	7
Tabla 2. <i>Resumen de criterios de búsqueda.</i>	13

Índice de figuras

<i>Figura 01.</i> Proceso de coagulación, floculación y sedimentación.	5
<i>Figura 02.</i> Proceso general para preparación de coagulante de origen vegetal. .	10
<i>Figura 03.</i> Interacciones esquemáticas del ácido poligalacturónico.....	10
<i>Figura 04.</i> Mecanismo de coagulación del mucílago OFI.....	11
<i>Figura 05.</i> Procedimiento de revisión sistemática.	16
<i>Figura 06.</i> Estado de material OFI.	20
<i>Figura 07.</i> Procedimientos de extracción de mucílago en solución acuosa.	21
<i>Figura 08.</i> Procedimientos de extracción de mucílago en polvo.	22
<i>Figura 09.</i> Eficiente proceso de extracción de mucílago en solución acuosa.	23
<i>Figura 10.</i> Eficiente proceso de extracción de mucílago en polvo.....	23
<i>Figura 11.</i> Remoción de turbidez con polvo OFI T.I. menor a 5000 UNT.....	24
<i>Figura 12.</i> Remoción de turbidez con polvo OFI, T.I. mayor a 5000 UNT.....	28
<i>Figura 13.</i> Remoción de turbidez con mucílago en solución acuosa.....	29
<i>Figura 14.</i> Remoción de STD con mucílago en solución acuosa y polvo.	32
<i>Figura 15.</i> Remoción de color con mucílago en solución acuosa y polvo OFI.	34
<i>Figura 16.</i> Remoción de DQO con mucílago en polvo.	35
<i>Figura 17.</i> Remoción de DQO con mucílago en solución acuosa.	37
<i>Figura 18.</i> Efecto del pH sobre la remoción de turbidez.....	38
<i>Figura 19.</i> Efecto del pH sobre la remoción de STD.	39
<i>Figura 20.</i> Efecto del pH sobre la remoción de color.....	40
<i>Figura 21.</i> Efecto del pH sobre la remoción de DQO.	41
<i>Figura 22.</i> Metodología eficiente de tratamiento de aguas con mucilago OFI.....	42

Resumen

El presente artículo revisó la información dispersa sobre la tecnología verde que involucra biomaterial derivado de *Opuntia ficus - indica*, como el mucílago, en la descontaminación de aguas residuales considerando métodos de extracción, pretratamiento, aplicación y principales resultados obtenidos de las investigaciones, los cuales muestran niveles prometedores. Los métodos de extracción se dividieron en solución acuosa y polvo, para luego pretratarlos con solventes como el cloruro de sodio (NaCl) buscando su optimización en el tratamiento, y se aplicaron velocidades entre 30 y 200 rpm para las mezclas tanto de coagulación como de floculación para posteriormente dejar actuar por un tiempo de 30 a 180 min. El biomaterial demostró ser eficiente en la eliminación de contaminantes y que es necesario explorar la ampliación del estudio desde la escala de laboratorio a la comunidad a través de pruebas piloto y eventualmente a niveles industriales, con capacidad de eliminación de contaminantes expresados en rangos de remoción entre 78.5 - 90.7%, 79.1 - 99%, 54 - 99.9%, y 37.9 - 91.2%, para turbidez, STD, color y demanda química de oxígeno, respectivamente, por proceso de coagulación - floculación.

Palabras clave: *Opuntia ficus*, tratamiento de aguas residuales, coagulante, mucílago.

Abstract

This article reviewed the scattered information on green technology that involves biomaterial derived from *Opuntia ficus - indica*, such as mucilage, in the decontamination of wastewater considering extraction methods, pretreatment, application and main results obtained from research, which have promising levels. The extraction methods were divided into aqueous solution and powder, and then pretreated with solvents such as sodium chloride (NaCl) seeking their optimization in the treatment, and speeds between 30 and 200 rpm were applied for both coagulation and flocculation mixtures. to later let it act for a time of 30 to 60 min. The biomaterial proved to be efficient in the elimination of contaminants and that it is necessary to explore the expansion of the study from the laboratory scale to the community through pilot tests and eventually to industrial levels, with the capacity to eliminate contaminants expressed in ranges of removal between 78.5 - 90.7%, 79.1 - 99%, 54 - 99.9%, and 37.9 - 91.2%, for turbidity, STD, color and chemical oxygen demand, respectively, by coagulation - flocculation process.

Keywords: *Opuntia ficus*, sewage treatment, coagulant, mucilage.

I. INTRODUCCIÓN

Las diferentes actividades antropogénicas que generan la descarga de efluentes han tenido como respuesta, la contaminación de cuerpos de agua, así como el crecimiento exponencial de la población y la expansión de las zonas urbanas, han incrementado los impactos nocivos sobre los recursos hídricos (Escobar, Soto y Toral, 2006, p. 7).

Municipios y gobiernos no han logrado combatir el aumento de la contaminación del agua a pesar de la existencia de estrictas leyes y políticas regulatorias. Metales pesados, colorantes, hidrocarburos, clorofluorocarbonos, hollín, partículas, fenoles, pesticidas, herbicidas y lodos tóxicos son algunos de los más comunes contaminantes ambientales que requieren reducción inmediata (Gupta, et al., 2009, p. 14; Renault, et al., 2009, p. 39).

Las estrategias de tratamiento para las aguas residuales han incluido adsorción utilizando carbón activado, filtración por membrana, uso de zeolitas ósmosis inversa, precipitación química, intercambio iónico, electroquímico tratamiento, extracción con solvente flotación para la eliminación de contaminantes inorgánicos y coagulación-floculación (Saleh y Gupta, 2012, p. 34). Estas tecnologías sufren de una gama de desventajas que van desde la generación de lodos tóxicos, altos costos iniciales, limitación en la eliminación de contaminantes a bajas concentraciones, complejidad del proceso, ensuciamiento de la membrana, alto consumo de químicos, elevados costos de mantenimiento y operación entre otros (Fu y Wang, 2011, p. 47; Mittal, et al., 2009, p. 22).

El primer tratamiento de aguas residuales se realiza a través del proceso de coagulación química convencional. Donde los floculantes inorgánicos han sido empleados durante muchos años. Los floculantes inorgánicos convencionales más utilizados incluyen sulfato de aluminio - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, sulfato de hierro (III) - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y cloruro de hierro (III) - FeCl_3 y derivados de estos materiales. Su uso va acompañado de un gran consumo de productos químicos que conducen a la producción de gran volumen de productos no biodegradables lodo que es difícil de deshidratar y costoso de disponer. (Aboulhassan, et al., 2014, p. 51).

Dentro de los coagulantes químicos, el más empleado en la industria del tratamiento de agua es el sulfato de aluminio, comercialmente llamado “alumbre”, el insumo químico presenta muy buenos resultados para la remoción de contaminantes en las aguas, sin embargo, el impacto económico y ambiental debido a su uso es bastante elevado, al utilizarlo produce grandes cantidades de lodos de residuales, los cuales son complicados de tratar (Donato, et al., 2006, p. 28).

Existe evidencia científica que relaciona al químico, con el avance de la enfermedad de Alzheimer, debido a la presencia de aluminio residual en el agua tratada (Flaten, 2001, p. 59), esto fue demostrado en investigaciones de carácter médico en Inglaterra, se halló que el riesgo de padecer este mal es 1,5 veces más alto que en los lugares donde las concentraciones de elemento en las aguas exceden los 0,110 mg/L (González, et al., 1991, p. 46). Es por ello que, como alternativa a los productos químicos, al comienzo de los años setenta, en diferentes países de Latinoamérica se ha propuesto emplear biocoagulantes extraídos de especies vegetales (Patel y Vashi, 2012, p. 52). Datando este empleo de varios milenios (Sanguí, et al., 2002, p. 7) y, continuamente se hacen estudios que permiten identificar la potencialidad de diferentes plantas para este fin.

Se han encontrado una cantidad sustancial de ventajas al emplear biocoagulantes para el proceso de la reducción de la turbidez, los cuales pueden ser consumidos por el ser humano, debido a ello es que su existencia en el efluente no le provoca un riesgo tóxico y los lodos producidos por estos coagulantes de especies vegetales son altamente biodegradables (Esquivel, 2004, p. 27). Al momento de emplear el alumbre como coagulante, se genera una mayor cantidad de lodos que al emplear coagulantes naturales. Además, los costos de adquisición (importación del sulfato de aluminio) son mayores en comparación con los costos de elaboración (transporte de los coagulantes producidos a base de plantas). Por estos motivos, se considera pertinente estar en búsqueda de fuentes naturales para la generación de coagulantes compatibles con el ambiente y más asequible a nivel económico (Gurdián y Coto, 2011, p. 64; Yin, 2010, p. 13).

Los cactáceas han demostrado su eficiencia de coagulación en un gran número de investigaciones. Sin embargo, su aceptación y aplicación en la industria del agua aún es limitada, es por ello que es necesario llevar a cabo una revisión para analizar los principales resultados obtenidos en los últimos años para de esta manera aumentar su uso potencial. La revisión se centró en la química verde que involucra materiales provenientes de la especie *Opuntia ficus-indica*, como son los cladodios frescos y el mucílago, utilizados para el primer tratamiento de aguas residuales que contienen principalmente altos niveles de turbidez, color y demanda química de oxígeno (DQO).

El problema general por el cual se elaboró el proyecto de investigación fue la limitada aplicación de coagulante natural producido a partir de *Opuntia ficus - indica* (OFI) en la industria del agua, así mismo a partir de ello, se plantearon los problemas específicos:

- ¿Cuáles son las principales metodologías para la elaboración y aplicación de biocoagulante a partir de *Opuntia ficus-indica*?
- ¿Cuáles son los resultados de la *Opuntia ficus-indica* como biocoagulante para el tratamiento de aguas residuales?
- ¿Cuál es la metodología más eficiente para el tratamiento de aguas residuales con biocoagulante OFI?

Para responder al problema general se planteó el objetivo: Realizar una revisión sistemática sobre la aplicación de la especie *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural en la biorremediación de aguas residuales. Adicionalmente, para los problemas específicos se propusieron los objetivos:

- Recopilar las principales metodologías de las últimas investigaciones para la elaboración de biocoagulante a partir de *Opuntia ficus - indica*.
- Analizar los resultados de la *Opuntia ficus - indica* como biocoagulante para el tratamiento de aguas residuales.
- Proponer la metodología más eficiente para el tratamiento de aguas residuales con biocoagulante OFI.

II. MARCO TEÓRICO

La remoción de turbidez y organismos tiene que ver con la eliminación de impurezas que están cargadas negativamente a niveles de pH natural y han formado una dispersión estabilizada (Bolto, 1995, p. 17). Arboleda (1992, p. 9), sostiene que la coagulación - floculación permite que las partículas se junten en diminutas masas; lo que produce la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos; destrucción de algas y plancton, así como la eliminación de sustancias productoras de sabor, olor y de precipitados químicos suspendidos.

Según Paixão & Balaban (2018, p. 14), la coagulación se considera como la operación fisicoquímica más importante para la eliminación de las impurezas del agua, debido a que los coagulantes se agregan para disminuir la carga eléctrica entre las partículas, permitiendo la desestabilización de las partículas coloidales, y formando micro – flóculos (Katrivesis et al., 2019, p. 38).

Las partículas coagulantes se pueden agregar y se pueden asentar en la solución, a través de cuatro mecanismos básicos: Compresión de la doble capa; por barrido; adsorción y neutralización de carga y adsorción y unión inter partículas (Crittenden, et al., 2005, p. 11; Miller, et al. 2008, p. 74; Bolto & Gregory, 2007, p. 23).

La floculación es una operación sucesiva a la coagulación, por ello la agitación no debe ser muy rápida pues puede provocar que los flóculos previamente formados se rompan (Trujillo, et al., 2014, p. 47). Los floculantes se agregan con el objetivo de mejorar la colisión y el crecimiento de flóculos (Paixão & Balaban, 2018, p. 31). Los procedimientos se detallan gráficamente en la figura 01.

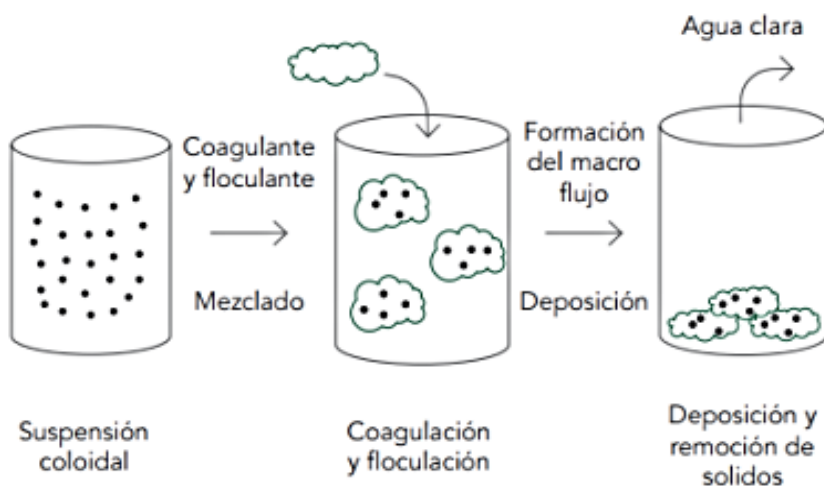


Figura 01. Proceso de coagulación, floculación y sedimentación.

Fuente: Arcila & Peralta (2016).

La adición de floculantes permite que los micro flóculos se unan unos a otros de tal manera que se formen flóculos más grandes y densos, logrando con esto que puedan precipitarse más fácilmente (Katrivesis, et al., 2019, p. 75).

La sedimentación es la remoción de las partículas más pesadas por la acción de la gravedad, en un tiempo determinado, los sólidos generalmente están constituidos de coloides, arenas y limos aglomerados en las dos etapas anteriores (Flórez, 2011, p. 53).

Los coagulantes poliméricos están involucrados principalmente con el mecanismo de adsorción y unión inter partículas, con estructuras de cadena larga, incrementando el número de sitios de adsorción desocupados (Yin, 2010, p. 27). Los contaminantes en aguas, se pueden clasificar según el tamaño, como: Sólidos suspendidos (superiores a 10 - 6 micras), minerales (arena, arcillas, etc.) u orgánicos (resultado de la descomposición de flora y fauna), además, microorganismos como bacterias, plancton, algas y virus (Yin, 2010, p. 27).

Según Vargas & Romero (2006, p. 32), los sólidos suspendidos, partículas coloidales, son responsables de turbidez y del color de las aguas residuales. Estos elementos se encuentran, mayormente, con carga negativa, esto se debe a la presencia de grupos funcionales carboxilo (RCOO^-) e hidroxilo (OH^-). La carga negativa provoca repulsión entre las partículas, evitando así la aglomeración y la formación de partículas de mayor tamaño que sedimentan sencillamente.

Además de los sólidos suspendidos, las sustancias disueltas también están involucradas, son usualmente sustancias inorgánicas (cationes, aniones) y sustancias orgánicas (ácidos, alcoholes, aldehídos, etc.). Existe la gran probabilidad de que gases estén presentes. Se tiene como principales coagulantes a los de origen metálico, los cuales han sido muy empleados para la remediación de aguas, tienen la capacidad de hacer tanto de coagulantes como floculantes y, al ser disueltos, forman compuestos complejos hidratados (Romero, 2000, p. 22).

Miller, et al., (2008, p. 10) señala que el comercialmente llamado, alumbre, es el insumo más empleado para la clarificación del agua ya que remueve los microorganismos (90- 99%) en óptimas condiciones. No obstante, también puede ser sencillamente asimilado por el organismo, provocando consecuencias potencialmente negativas a largo plazo. Entre los males asociados están variedades de cáncer, Alzheimer y enfermedades óseas (Gurdián y Coto, 2011, p. 74). Al utilizar el sulfato de aluminio, se genera elevadas cantidades de lodos residuales, estos ya no están en la capacidad para ser reutilizados como biosólidos por la razón que impactan negativamente tanto los suelos como el agua debido a su ecotoxicidad (Ganjidoust, et al. 1997, p. 65).

Las ventajas de los coagulantes – floculantes poliméricos van desde ser fácil de manejar, baja probabilidad de modificar el pH al agua tratada, tener alta solubilidad, reducción del volumen de lodo, muy disponible, biodegradable y producción de grandes, densos y compactos flóculos con buenas características de asentamiento. Químicamente en su composición, estos polímeros son complejos, formados esencialmente por diferentes variedades de polisacáridos y proteínas (Chung, 2010, p. 51).

Hasta la fecha existe un número sustancial de polímeros y polielectrolitos naturales que han sido explorados en la descontaminación de aguas residuales ya sea a través de procesos de adsorción o coagulación / floculación, entre ellas se encuentra la familia de las cactáceas, la cual se establece como una de las más abundante en el territorio peruano, hallándose, en gran variedad, en la totalidad de los pisos altitudinales. Además, han estado involucradas en diferentes culturas y países de Latinoamérica (Chung, 2010, p. 30).

2.1. Descripción de *Opuntia ficus-indica*.

Planta cetácea conocida también como cactus o tuna que se adapta fácilmente a zonas con escasez de agua. Las pencas son de color verdoso y no presentan abundantes espinas, lo que hace que no sea muy complicada su recolección, además posee frutos comestibles y pueden alcanzar una altura de 5 metros (Ortíz, Paz, & García, 2013, p. 16). La planta se originó en regiones áridas y semiáridas de México y fue introducido en el norte de África. Es originaria de América del Sur, pero también se encuentra en África, Australia, sur de Europa y Asia (Betatache, et al., 2014, p. 7). La familia *Cactaceae* se encuentran en la cuenca mediterránea, Medio Oriente, Sudáfrica y India. La planta ahora se encuentra en la mayoría de las partes del mundo (Finti, et al., 2013, p. 6). La taxonomía de la *Opuntia ficus – indica* se detalla a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. *Taxonomía OFI.*

Nombres comunes:	Nopal, Tuna, Higo indio
Nombre botánico:	<i>O. ficus-indica</i>
Reino:	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden:	<i>Caryophyllales</i>
Familia:	<i>Cactaceae</i>
Género	<i>Opuntia</i>
Especie	<i>ficus-indica</i>

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

El género de cactus comúnmente estudiado para el tratamiento del agua es *Opuntia*, que se conoce coloquialmente como 'nopal' en México o 'tuna' en América del Norte. Este tipo de cactus se ha asociado durante mucho tiempo con sus propiedades medicinales y fuentes de alimentos dietéticos. Además de *Opuntia*, otras especies de cactus, incluido el cactus *latifaria*, también se han utilizado con éxito como coagulantes naturales.

La alta capacidad de coagulación de *Opuntia* se atribuye muy probablemente a la presencia de mucílago, que es un carbohidrato complejo y viscoso almacenado en las almohadillas internas y externas de los cactus que tiene una gran capacidad de retención de agua (Saravanakumar, et al., 2015, p. 11).

A lo largo del tiempo, se han empleado una variedad de técnicas para explorar los diferentes tipos de superficie y parámetros internos que están asociados con la especie *Opuntia ficus – indica* (OFI), en mucílago y polvo. Se revisaron los rasgos característicos que se han establecido para asociarse con OFI que están relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, que incluyen el área de superficie de biosorción, grupos funcionales superficiales, textura de la superficie y morfología junto con azúcares, ácidos grasos minerales elementos y compuestos fenólicos (Paixão & Balaban, 2018, p. 81).

2.2. Composiciones fisicoquímicas de cladodios y mucílagos.

Fox, et al., (2012). La caracterización infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) proporciona huellas dactilares químicas de la superficie. Mediante esta técnica se identifican los grupos funcionales. Diferentes investigadores caracterizaron polvos y mucílago OFI por la técnica FTIR (p. 23).

Las habilidades de coagulación-floculación exhibidas por OFI se remontan a los compuestos presentes en el mucílago, se conoce la existencia de L-arabinosa (46.20%), D - galactosa (19,17%), L - ramnosa (6,72%), D - xilosa (24,04%) y ácido galacturónico (7,10%) en el mucílago. (Adjeroud, et al., 2015; Morejón, 2017, p. 45).

El ácido poligalacturónico derivado de los monómeros galacturónicos fue ser el principal componente responsable de la actividad de coagulación en polvos OFI, mucílagos y polielectrolitos (Mastuhiro, B. et al., 2006, p. 40).

Se han identificado los grupos funcionales presentes en estos azúcares en los espectros OFI FTIR involucrados en la adsorción de contaminantes, entre los cuales se encuentran los ácidos carboxílicos, grupos carboxilos e Hidroxilos (Medina, et al., 2011, p. 65; Saravanakumar, et al., 2015, p. 23).

Además de los carbohidratos, los materiales OFI también contienen una gama de fitoquímicos; fenólicos, carotenoides, flavonoides y flavonoles ácido ascórbico y betalaínas, minerales, varios aminoácidos (Hernández, et al., 2010; Nadia, et al., 2013), aminas, vitaminas, ácidos orgánicos, lípidos y terpenos (El – Mostafa, et al., 2014; Ginestra, et al., 2009; Jimenez, et al., 2014; Khatabi, 2013; Stintzing y Carle, 2005). Estos compuestos, basados en los grupos funcionales que poseen contribuyen a la actividad de coagulación y adsorción de contaminantes, sostiene la habilidad evidente en OFI.

Betatache, et al. (2014, p. 52) descubrió que el jugo OFI tiene un pH de 4.76 con pH de carga de punto cero de 4, 1.3% de materia mineral, concentración de carbohidratos (4.109 g/L), materia orgánica del 98.7%, 28.6 g/L seco materia y 11.076 g /L de ácido galacturónico.

Algunos autores investigaron la variación de los parámetros fisicoquímicos con la edad de tunas. Se descubrió que los carbohidratos aumentan con la edad de la espinosa, además indican que eran el componente principal de la planta (Hernández, et al., 2011). Rodríguez, et al., (2007) informaron porcentajes como calcio (1.35-3.3%), fósforo (0.29-0.38%), sodio (0.12-0.21%) y potasio (5.52-6.84%) en polvo de OFI junto con saponinas, esteroides y taninos.

La presencia de carbohidratos complejos, proteínas, petróleo crudo, grasas, fibras en los cladodios OFI y su mucílago hacen de la planta un buen candidato en química de superficie donde los grupos funcionales en estos materiales proporcionan grupos tensioactivos y moléculas complejas que participan en procesos de sorción y coagulación-floculación en tratamiento de aguas residuales (Vijayaraghavan, 2011, p. 20).

Los pasos generales del procedimiento para la preparación de coagulantes de origen vegetal abarcan la eliminación de piezas no deseadas de la planta mediante corte, rebanado, etc., seguido del secado a diferentes temperaturas, se pulveriza el material obtenido ya sea manual o mecánicamente, para luego realizar la extracción con solventes orgánicos – alcohólicos, agua o soluciones salinas. Para finalizar en el proceso de purificación pueden ser utilizados diferentes métodos como: Diálisis, liofilización, intercambio iónico y precipitación Ver figura 02.

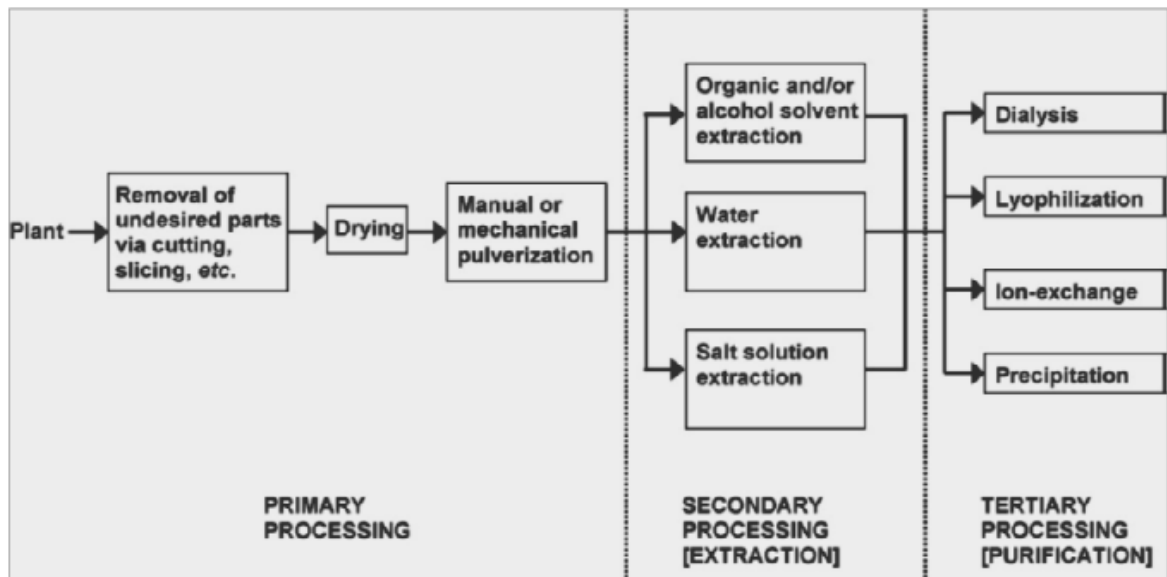


Figura 02. Proceso general para preparación de coagulante de origen vegetal.

Fuente: Vijayaraghavan (2011, p. 22).

La estructura del ácido poligalacturónico es aniónico debido a la desprotonación parcial de grupo funcional carboxílico en la solución acuosa. La existencia de tales grupos funcionales a lo largo de la cadena de ácido poligalacturónico implica que la adsorción entre partículas cargadas y COO^- pueda ocurrir. La representación esquemática del ácido poligalacturónico en solución acuosa e interacciones moleculares asociadas con la formación de puentes se grafican en la figura 03. (Vijayaraghavan, 2011, p. 24).

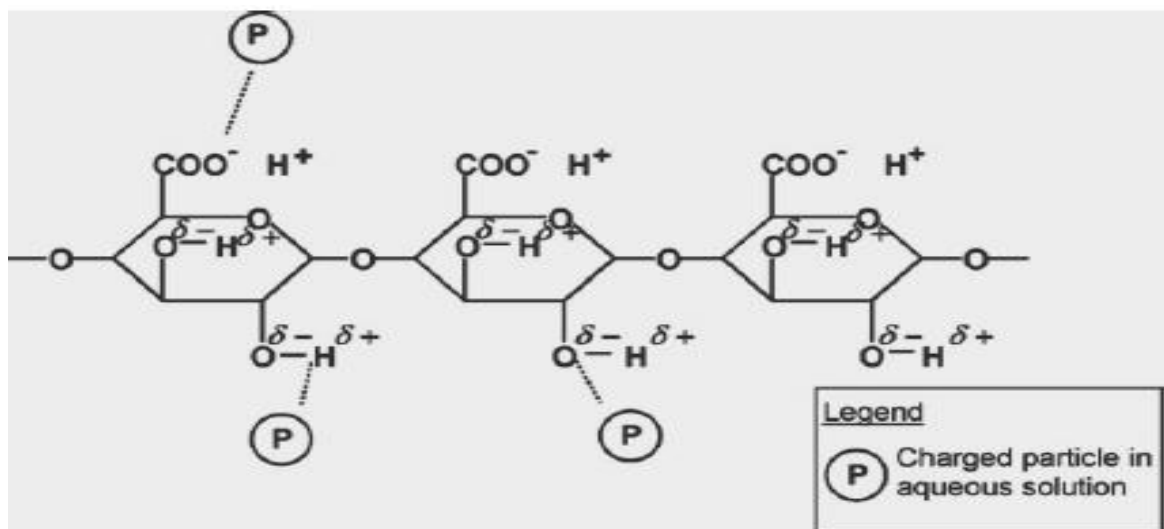


Figura 03. Interacciones esquemáticas del ácido poligalacturónico.

Fuente: Vijayaraghavan (2011, p. 24).

La desestabilización se produce mediante la adsorción de partículas coloidales en la cadena principal y cadenas laterales de polisacáridos de OFI y formando el puente de partículas de polisacárido - partícula. La adsorción puede tener lugar a través de interacciones dipolo-dipolo y enlaces de hidrógeno. Debido al alto peso molecular de los polisacáridos, sus cadenas largas pueden estirar en el medio y puede adsorber la mayor cantidad de contaminantes. Los electrolitos naturales del mucílago de OFI, específicamente iones divalentes como Ca^{+2} y Mg^{+2} , tienen un efecto sinérgico sobre la coagulación al potenciar la formación de complejos. (Choudhary, et al., 2018, p. 21).

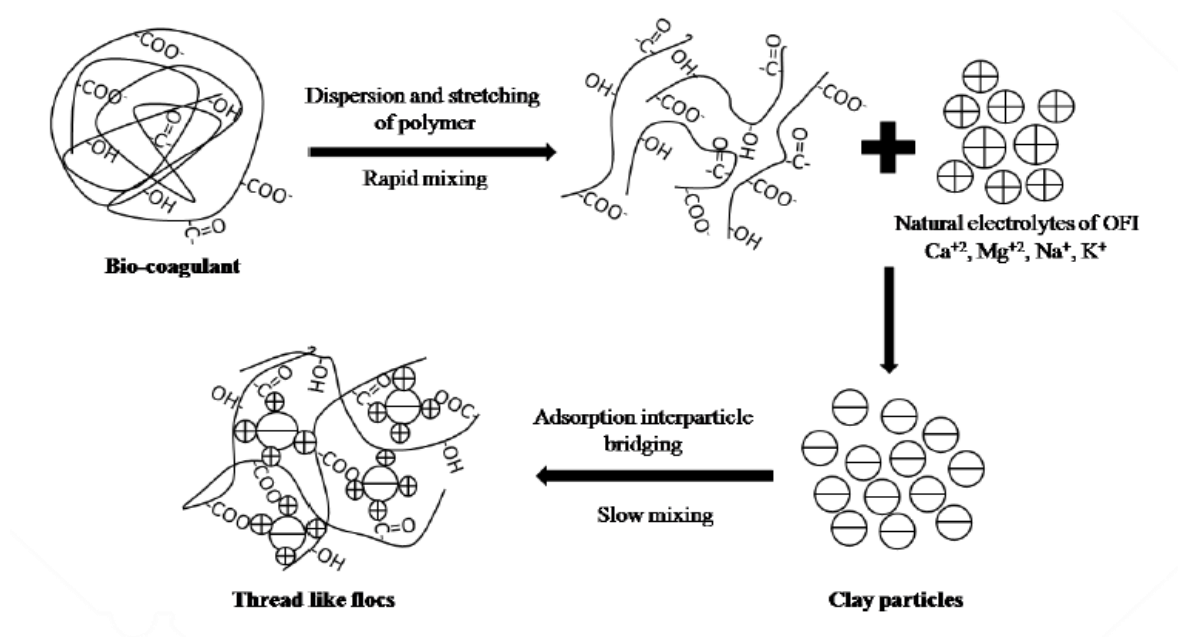


Figura 04. Mecanismo de coagulación del mucílago OFI.

Fuente: Choudhary, et al., (2018, p. 21).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación.

Tipo de investigación:

La metodología del presente proyecto se consideró aplicada, debido a que la investigación, en este caso, se ha orientado a resolver un problema que se presenta en el proceso de producción de un servicio de una actividad humana, además, de ser una investigación en tecnologías físicas, por la razón que estuvo dirigida a crear, mejorar, optimizar un mecanismo o procedimiento, sistemas en el campo de la tecnología de la ingeniería. (Ñaupas H., 2013, p. 4)

Diseño de investigación:

El proyecto es una investigación documental de modalidad estado de arte, por la razón que admitió el análisis de la información recolectada, en textos, inmerso en un área específica, utilizada anteriormente como una herramienta para compilar y sistematizar información. Su ejecución permitió el tránsito de la información, creó una petición de conocimiento y determinó contrastaciones con diferentes conocimientos paralelos a este, presentando diferentes posibilidades de comprensión del problema tratado. (Molina N., 2005, p. 5).

3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística.

El proyecto se dividió en categorías para el mejor análisis y desarrollo de objetivos, las cuales comprenden: Metodologías aplicadas, resultados obtenidos de las investigaciones y procedimientos para la metodología más eficiente; así como Sub categorías: Características de extracción de material OFI, pretratamiento de material OFI, método de aplicación de biocoagulante, remoción de turbidez, remoción de sólidos disueltos totales, remoción de DQO, remoción de color y efecto de pH; todos se encuentran expresados en el anexo 1. Además, se tuvo en cuenta diferentes criterios de exclusión e inclusión los cuales se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de criterios de búsqueda.

Palabras Clave	Documentos encontrados	Criterio de inclusión	Criterio de exclusión	Tipo de documento
<i>Opuntia ficus</i> , coagulante, tratamiento de aguas, aguas residuales, nopal, tuna, cladodios, mucilago, remoción.	137 (ciento treinta y siete)	Documentos con extracción de material OFI en polvo y/o solución acuosa.	Documentos sin extracción de material OFI en polvo ni solución acuosa.	Artículo
		Documentos con etanol de solvente, cloruro de sodio, agua o sin pretratamiento	Pretratamiento con otros solventes	
	Documentos analizados	Documentos que contengan dosis, mezcla rápida, mezcla lenta y/o sedimentación	Documentos que no contengan dosis, mezcla rápida, mezcla lenta ni sedimentación	
	19 (diecinueve)	Documentos de Brasil, Canadá, Colombia, India, Irak, México, Malasia, Sudáfrica y Túnez.	Documentos de países que no sean Brasil, Canadá, Colombia, India, Irak, México, Malasia, Sudáfrica y Túnez.	
		Documentos en idioma inglés o español.	Documentos que no estén en idioma inglés o español.	
		Documentos que no excedan de los 8 años de publicación.	Documentos que excedan de los 8 años de publicación.	

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

3.3. Escenario de estudio.

La presente investigación no posee escenario de estudio fijo, puesto que se basa en información recolectada de documentos textuales de diferentes naciones, cómo son Brasil, Canadá, Colombia, India, Irak, México, Malasia, Sudáfrica y Túnez.

3.4. Participantes.

Los participantes en la investigación de los cuales se obtuvieron información fueron mayormente artículos técnicos. Se buscó que el material de información esté indexado en bases de datos como son EBSCO, BASE, Science D, Scielo, Taylor & Francis, Springer y Scientific R.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Se empleó como técnica el análisis documental, donde se realizó un proceso de interpretación y análisis de la información para después de ello, sintetizar, dando espacio a un subproducto que funciona como instrumento de búsqueda entre el documento inicial y el lector que solicita información. (Castillo L., 2005, p. 9). Y como instrumento, una matriz de categorización apriorística, la cual sirvió para analizar de acuerdo a las categorías planteadas.

Se utilizó, también, una ficha de recolección de datos de los documentos revisados que contienen país, autor, objetivo, agua residual, pretratamiento, solvente, aditamento, resultado, fuente y año; tal como se muestra en el anexo 2.

3.6. Procedimiento.

A lo largo del proyecto se obtuvieron un conjunto de investigaciones, las cuales fueron descartados por los criterios de exclusión mediante un procedimiento dividido en 3 fases: Etapa de búsqueda, etapa de selección y etapa de análisis.

- Etapa de Búsqueda: Se procedió realizar la indagación de la información a través de bases de datos y fuentes confiables.
- Etapa de Selección: De la cantidad de investigaciones encontradas, se excluyeron por motivo de ser inaccesibles, duplicados o no contar con información para la investigación.
- Etapa de Análisis: Se realizó un último descarte para elegir los trabajos a analizar.

Las etapas se plasman en la figura 05.

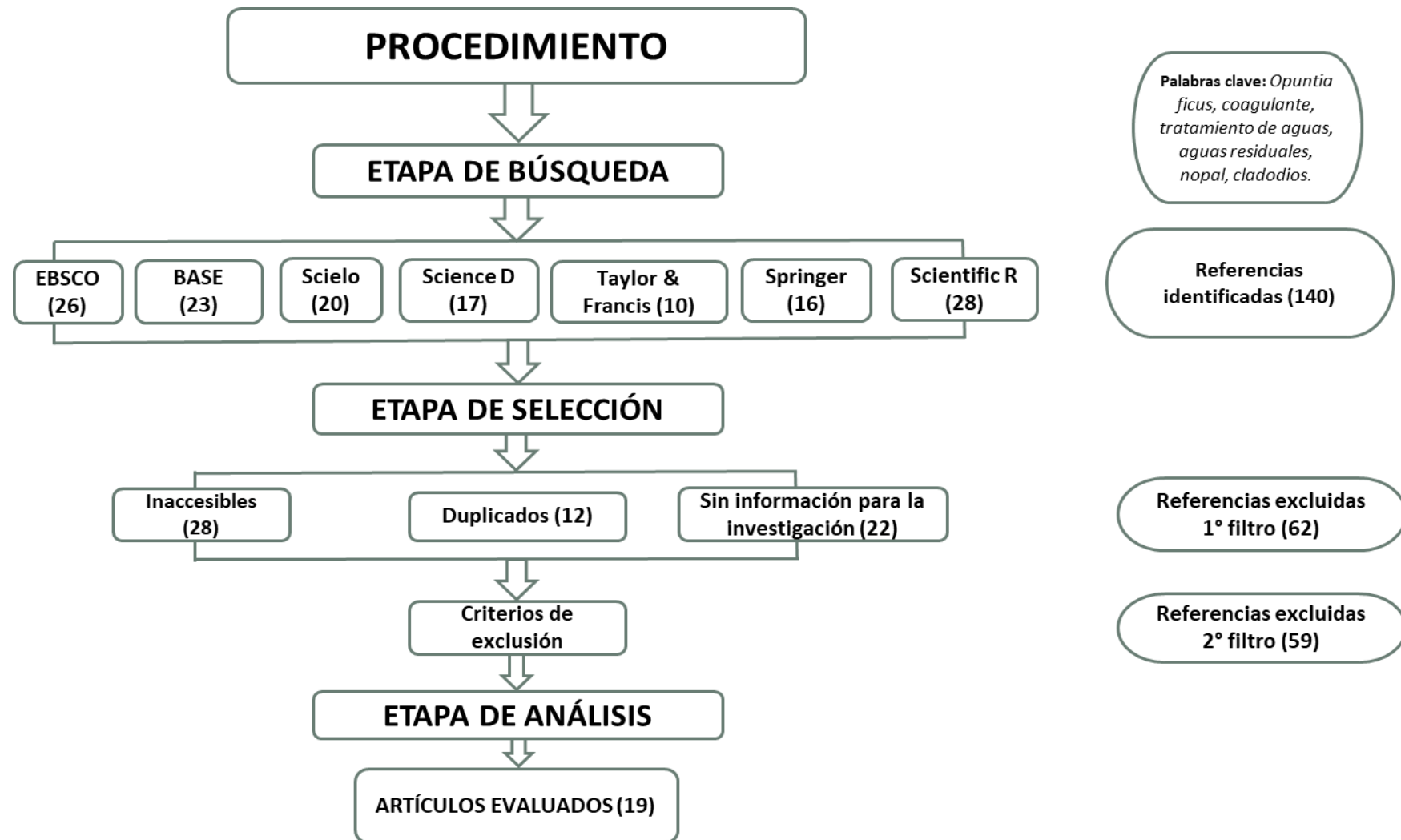


Figura 05. Procedimiento de revisión sistemática.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

3.7. Rigor científico.

La investigación abordó como tema central el tratamiento de agua residuales con *Opuntia ficus - indica* como coagulante natural, mediante la revisión de fuentes documentales, con el propósito de instaurar conclusiones referentes con los objetivos del estudio realizado.

Los resultados se clasificaron e interpretaron según la ficha de recolección de datos, estos se desarrollaron en el software Excel Professional Plus 2016.

3.7.1 Consistencia lógica.

En la presente investigación se procuró una relativa estabilidad en la información obtenida y analizada sin haber perdido la naturaleza de la investigación cualitativa.

Para conseguir la consistencia de los datos se emplearon procedimientos específicos tales como: la triangulación de investigadores; de métodos y de resultados; la descripción detallada del proceso de recolección, análisis e interpretación de los datos, que permitió revisar y comparar la información (Noreña A. et al, 2012, p. 10).

3.7.2 Credibilidad.

Envuelve la valoración de las situaciones en las cuales una investigación pueda ser reconocida como creíble, en este sentido, es imprescindible la indagación de fundamentos confiables que pueden ser sustentados en los resultados del estudio elaborado, de acuerdo con la metodología seguida en el proyecto. (Suarez E., 2007, p. 12).

La credibilidad en la presente investigación, se apoyó en los siguientes aspectos: Respeto por los hechos y situaciones generados en el contexto temporal y espacial de la investigación; estimación valorativa de los datos y/o información derivada de los instrumentos aplicados; además, entra en consideración que se estudiaron investigaciones de alto nivel en cuanto al sitio de su obtención.

3.7.3 Transferencia.

Entra a tallar la posibilidad de poder trasferir los resultados de la investigación para ser aplicados a otros contextos (Fernández, 2006) señaló que se debe tener muy en consideración que los acontecimientos observados estén muy asociados a los momentos, a las situaciones del contexto y a los participantes de la investigación mediante una descripción exhaustiva de las cualidades del contexto en que se ejecuta la investigación y de los participantes.

La descripción fue de utilidad al realizar comparaciones y descubrir lo común y lo específico con otros estudios. Los resultados derivados del presente estudio, son transferibles y aplicables a otros contextos y/o ámbitos de acción, criterio del cual se tiene razón plena.

3.7.4 Confirmabilidad.

Entendida como la posibilidad de que con la misma información recogida diferentes investigadores lleguen a conclusiones similares. Existe alta posibilidad de que se arriben a resultados similares en la investigación, más no idénticos. (Flick 2004, p. 15).

3.8. Método de análisis de datos.

Para la investigación se tuvo un enfoque de análisis en progreso como lo propuesto por Tayrlor & Bogdan (1990), compuesto por fases de descubrimiento, codificación y relativización. El enfoque consistió en la codificación por categorías y subcategorías de acuerdo a los criterios establecidos en la matriz de categorización apriorística. Ver anexo 1.

Se consideró el proceso de evaluación de análisis crítico, el cual permitió tener una idea del potencial de error en los resultados de la investigación, ya sea por sesgo o confusión, este corrobora si el estudio cumple los criterios metodológicos deseables.

La validez interna del estudio se representó en la capacidad de los resultados de la investigación de representar la verídica relación entre una exposición y un desenlace, bajo las circunstancias en que fue elaborado.

3.9. Aspectos éticos.

En todo el desarrollo del estudio se respetó la propiedad intelectual, derechos de autor, principios éticos del profesional, lineamientos y protocolos dispuestos por la universidad César Vallejo. Además de la veracidad de la información encontrada en tesis y/o artículos obtenidos de bases de datos reconocidas.

El proyecto de investigación siguió con el código de ética, presentando un documento con principios y valores reconocidos y respetados por el autor, así como también los lineamientos y protocolos dispuestos por la Universidad César Vallejo.

La redacción de citas bibliográficas se basó en el estilo ISO 690, asegurando la confiabilidad sobre el derecho de autor por las diferentes fuentes de información para el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, el proyecto de investigación se evaluó mediante el software Turnitin detectando coincidencias en la redacción del estudio con respecto a otras investigaciones, asegurando que es veraz.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Generación de material OFI para tratamiento de aguas residuales.

Existe una variedad de formas para trabajar los cladodios del cactus que se utilizan para el tratamiento de aguas a través de coagulación - floculación. Los pasos de preparación varían ligeramente en función de si se extrae el mucílago directamente en su solución acuosa o en polvo. De tal forma que el 63% (doce) de las diecinueve investigaciones, lo extrajeron como polvo OFI, mientras que 37% (siete) de los artículos analizados optaron por extraerlo en solución acuosa. Los porcentajes se grafican en la figura 06.

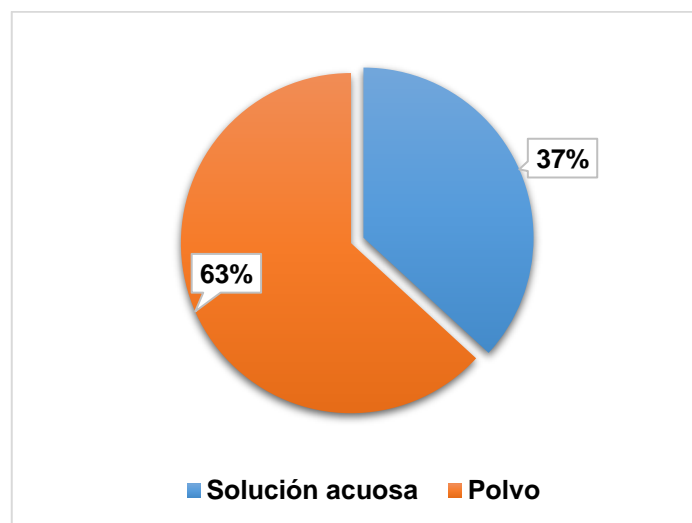


Figura 06. Estado de material OFI.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

- Obtención de mucílago en solución acuosa.

Para la obtención de mucílago como solución acuosa se realizan los procedimientos generales de Choque D., et al. (2018): Remoción de corteza, espinas, división en trozos, trituración y tamizado sin embargo, Al-aubadi I. & Hashim L. (2015) y Torres, L. & Carparinteryro S. (2012), luego de eliminar la corteza, realizan cocción con el fin de extraer el mucílago para posteriormente tamizarlo y obtener el resultado final, contradiciendo las metodologías de Rachdi R. et al. (2017) y Choudhary M. et al. (2018), quienes luego de la trituración de materiales OFI extrajeron el mucílago mediante el filtrado y centrifugado respectivamente.

Por otro lado, Contreras K., et al. (2013) seguido de la trituración utiliza un secado para deshidratar los fragmentos de los cladodios y finalmente agrega a su procedimiento un centrifugado para la mejor separación de fibra y mucílago.

Procedimientos que se expresan de izquierda a derecha en la figura 7 y 8, de manera que todos los autores siguen inicialmente el procedimiento general de Choque D., et al. 2018 para luego elegir variantes que son diferencias por un color según cada autor.

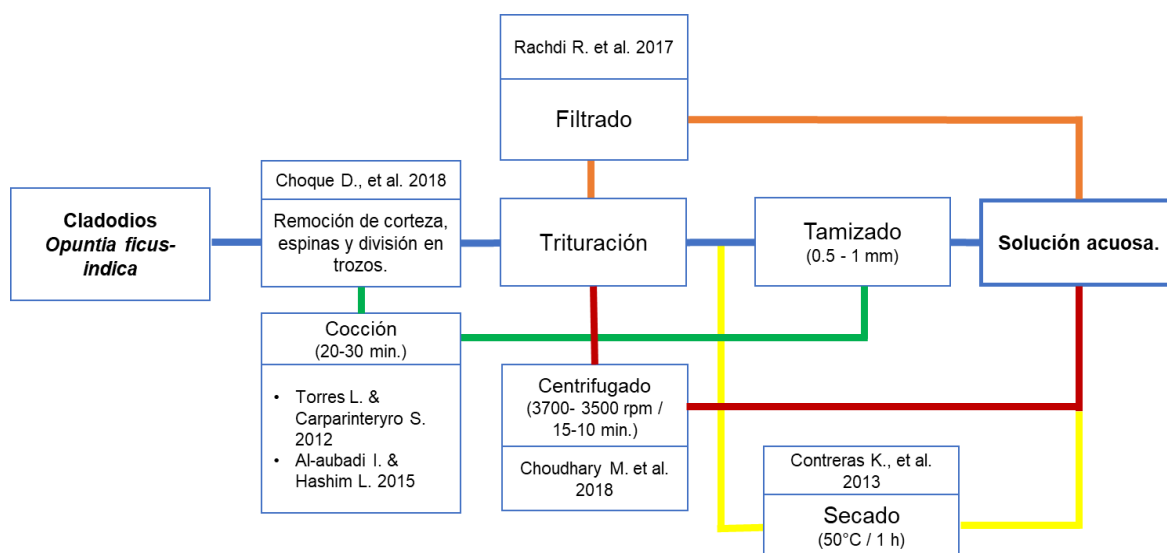


Figura 07. Procedimientos de extracción de mucílago en solución acuosa.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

- Obtención de mucílago en polvo.

La producción de polvo en comparación a la solución acuosa de mucílago tiende a ser más práctico en relación a los procedimientos a realizar, se remueve el material no deseado (tanto corteza como espinas) y se cortaron en trozos (1 - 5 cm) para luego someter los trozos al proceso de secado, la temperatura y tiempo de secado varían ligeramente entre los autores, predominando 60°C por 48 h, sin embargo, la variación de temperatura no afectará la eficiencia de la especie puesto que solo se está buscando la deshidratación máxima para la trituración y tamizado posterior, el cual debe buscar que el diámetro de la partícula sea menor o igual inferior a 0.5 mm para favorecer la extracción de pigmentos en las aguas a tratar. (Villavona Á., et al. 2013); (Fuentes N., et al. 2016); (Vishali S. & Karthikeyan R. 2014); (Madhukar V. & Yogesh S. 2014); (Najib, N. et al., 2020); (Shilpa et al., 2012); (Kazi T. & Virupakshi A. 2013) y (Al-Saati, N. et al. 2016).

Olivero R. (2014), en cambio, utilizó el proceso de secado, previa centrifugación para la mejor separación de fibra y mucílago. Por su parte, (Bouatay. F. & Mhenni. F 2014), al finalizar el proceso de tamizado, deshidrata el pre producto con el objetivo de eliminar cualquier exceso de humedad.

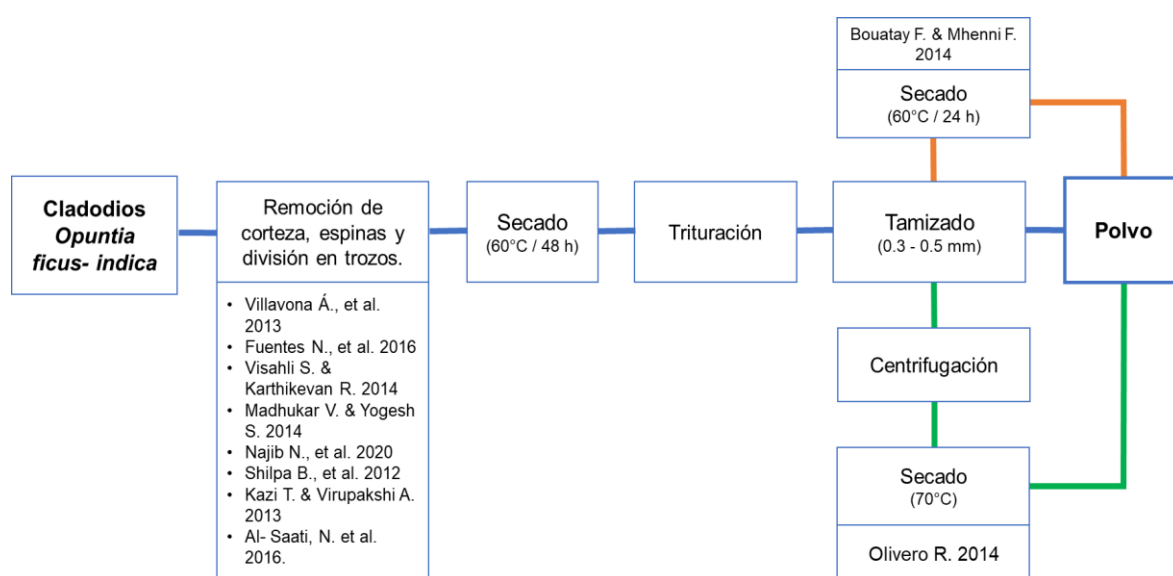


Figura 08. Procedimientos de extracción de mucílago en polvo.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

De lo anteriormente descrito se puede mencionar que el procedimiento general de Choque D., et al. (2018) con la variante de centrifugado (3700 rpm por 10 min.) y posterior sedimentación de 10 – 15 min., propuesto por Choudhary M. et al. (2018) permitirá la eficiente obtención de mucílago en comparación a las demás investigaciones con procesos prescindibles.

Ver *Figura 09*.

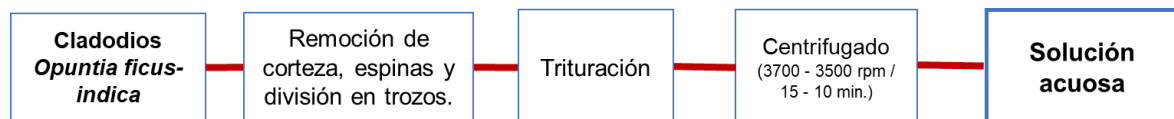


Figura 09. Eficiente proceso de extracción de mucílago en solución acuosa.

Fuente: Choudhary M. et al. (2018).

Mientras que, para conseguir mucílago en estado de polvo, se deberá realizar, como la mayoría de autores, la remoción de corteza, espinas y división en trozos, posteriormente para reducir el tiempo de secado se eleva la temperatura a 100° por 2 horas, teniendo como fin la máxima deshidratación del material OFI, seguido de una trituración y tamizado para obtener partículas de 0.3 a 0.5 mm, de este procedimiento se deberá obtener en promedio 100 gramos por cada kilo de cactácea, estableciéndose un rango de aprovechamiento entre 6.5 y 12.27%.



Figura 10. Eficiente proceso de extracción de mucílago en polvo.

Fuente: Vishali S., et al. (2014).

4.2. Reducción de parámetros físico - químicos por coagulación - floculación utilizando *Opuntia ficus - indica*

- Remoción de turbidez con polvo OFI T.I. menor a 5000 UNT

La remoción de turbidez con polvo del cactus, genera una ligera tendencia de crecimiento en función a la turbidez inicial, es decir entre más concentración de este parámetro contenía el agua a tratar, más eficiente se ha mostrado el material OFI. Estableciéndose un rango de eficiencia de 67 a 99.7%.

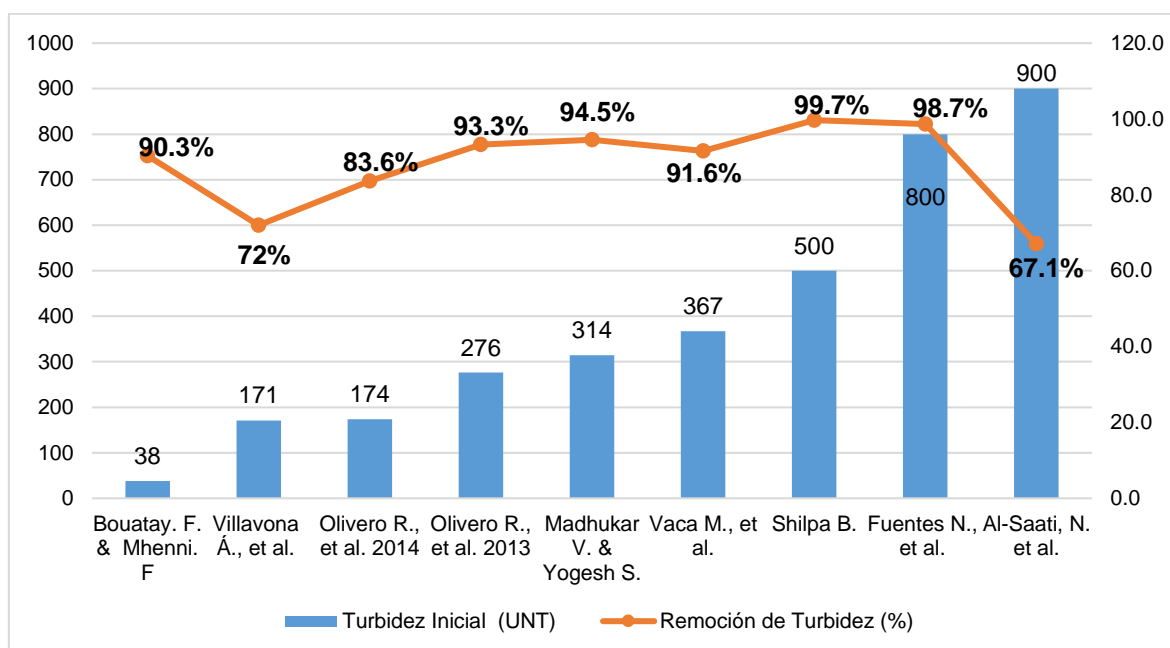


Figura 11. Remoción de turbidez con polvo OFI T.I. menor a 5000 UNT.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Existen autores que con sus resultados deforman la curva de eficiencia como es Villavona Á., et al. (2013) con un 72%, quién, como la mayoría de autores, realiza el procedimiento general y extrajo los componentes activos encargados de la coagulación con etanol 96%. Para la aplicación del biocoagulante utilizó 90 mg/L, dos veces la dosis en comparación a sus similares, con solo una mezcla rápida de 30 rpm, la cual no realiza una dispersión y estiramiento del polímero eficiente para comenzar con el mecanismo de coagulación, al ser una frecuencia muy por debajo de los demás autores quiénes obtuvieron mejores resultados con velocidades de mezcla rápida en un rango de 100 - 200 rpm.

Por otro lado, Al-Saati, N. et al. (2016) utiliza agua como solvente de extracción, la cual no ha sido la más seleccionada por los investigadores, debido a que no es capaz de extraer los pigmentos clorofílicos (clorofila), cuya composición química la vuelve no hidrosoluble, caso contrario sucede con el etanol, la solubilidad de la clorofila en alcohol, hace que este solvente sea empleado en la fase inicial de los experimentos para la extracción de pigmentos vegetales. Al tratarse de producir un coagulante, se prefiere que este sea incoloro para no impactar, aún más, negativamente las características del agua a tratar, desfavoreciendo así, la efectividad de la *Opuntia* para el parámetro de turbidez. La diferencia de porcentaje de remoción radica también en la baja dosis (2 mg/L) de biocoagulante aplicado a la muestra de agua de canal, a pesar de que el autor utiliza una alta frecuencia de mezcla rápida para la coagulación (250 rpm) y mezcla lenta para promover la formación de flóculos (25 rpm), la dosis se encuentra muy por debajo en comparación con los autores con mejores resultados.

Conclusión contrapuesta por Shilpa et al. (2012) y Madhukar V. & Yogesh S. (2014) quienes no realizaron la extracción de componentes activos, obtuvieron un porcentaje máximo de remoción igual a 99.7% y 94.5% respectivamente, lo cual tiene su fundamento en el origen de las muestras, a diferencia de los demás autores, Shilpa et al. (2012) y Madhukar V. & Yogesh S. (2014) experimentaron con agua sintética a partir de caolín, la cual posee una relativa mayor facilidad de remoción debido a que solo existe un solo contaminante en el ejemplar. Ahora bien, la ligera disimilitud entre estos 2 autores se ejerce en la dosis aplicada, Shilpa et al. (2012) emplea 20 mg/L, mientras que Madhukar V. & Yogesh S. (2014) aumentan a 75 mg/L, una concentración que, sin pretratamiento de extracción, perjudica a la remoción del parámetro debido al contenido de fibra en el biocoagulante.

Comparando los 2 distintos estudios de Olivero R. (2014), en diferentes años se puede deducir en primera instancia que el secado para la obtención de mucílago y la maceración posterior a la extracción de compuestos activos no ayudan a mejorar la eficiencia del coagulante, puesto que, Olivero R. (2013), con los procedimientos generales para la obtención de mucílago, misma dosis (40 mg/L), solvente (etanol), y tiempo de sedimentación (60 min.), superó en un 10% el porcentaje de remoción.

A pesar de utilizar una mayor velocidad de mezcla rápida (200 rpm/1 min), los resultados de Olivero R. (2014), fueron inferiores, teniendo en cuenta que tuvo mayor concentración inicial del parámetro a remover, se sostiene que existe, además, un criterio que explique la diferencia de porcentajes.

Todos los autores analizados en la gráfica no utilizan un aditamento químico para cumplir el objetivo planteado, a excepción de Bouatay. F. y Mhenni. F. (2014), que muestra un porcentaje de remoción igual a 90.3% en aguas residuales textiles, cifras comparables con las de los estudios que no adicionaron un agregado químico como es el sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ a una dosis de 3 mg/L junto con los 40 mg/L de OFI. Debido al uso del coagulante químico el autor no vio necesario realizar una extracción de pigmentos clorofílicos.

- **Remoción de turbidez con polvo OFI T.I. mayor a 5000 UNT**

La eficiencia de la especie cactácea también se lleva a muestras con altas concentraciones de turbidez mayores a 5000 UNT, ver figura 12, a cambio de utilizar una mayor dosis del biocoagulante, Vishali S. & Karthikeyan R. (2014), difiere en el proceso de extracción, suspendiendo 3 gramos de polvo OFI en 100 ml de cloruro de sodio (NaCl) como eluyente a 3 M de concentración, para después utilizar el líquido sobrenadante (eluido).

Al aumentar la concentración para el tratamiento, Vishali S. & Karthikeyan R. (2014) notaron una disminución en la eficiencia de eliminación, esto se debe a que, aunque hubo un aumento en la dosis de coagulante, el volumen de NaCl a 3 M utilizado para la elución, se mantuvo constante en 100 ml. En un nivel de dosis más alto, el volumen del eluyente utilizado puede ser insuficiente para extraer todos los componentes activos.

El autor escogió este eluyente buscando generar un estrés hídrico en el material, lo cual conlleva a la despigmentación significativa de clorofila, esto va de la mano con la excesiva acumulación de sodio, lo que desequilibra los niveles de diferentes elementos como calcio, potasio y magnesio, lo cuales poseen un efecto sinérgico sobre la coagulación al potenciar la formación de complejos.

La eficacia de la sal para la extracción de polielectrolitos naturales está relacionada con la capacidad de neutralizar partículas que no se sedimentan fácilmente. El NaCl, además, acelera la división de las interacciones de las proteínas y la solubilidad de las proteínas debido al aumento de la fuerza iónica (Okuda et al. 1999).

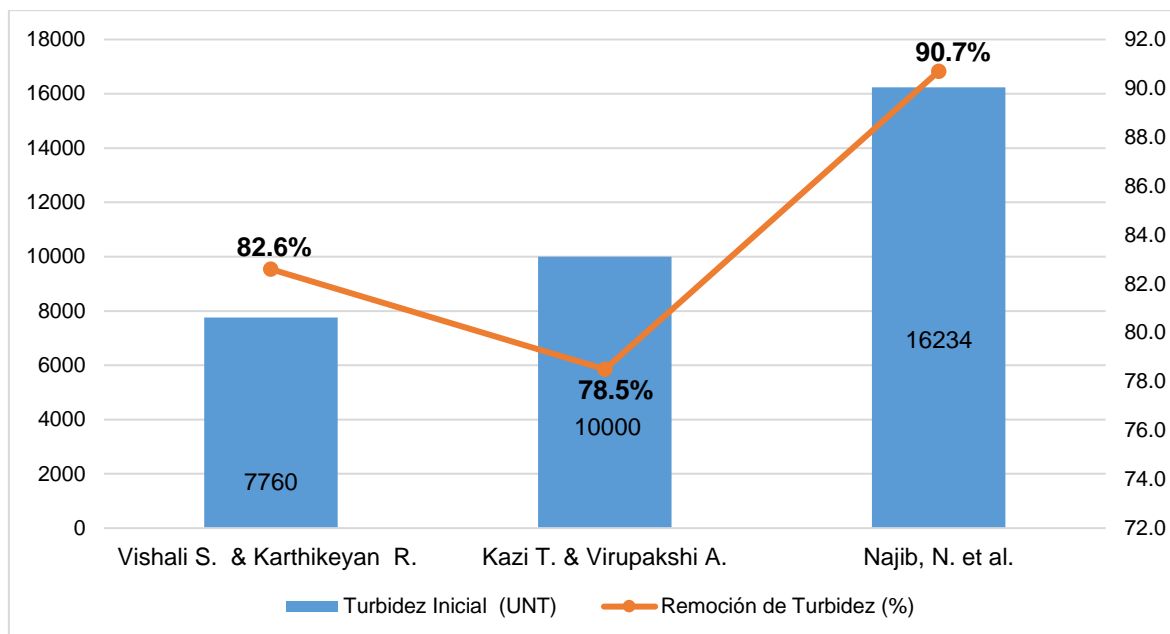


Figura 12. Remoción de turbidez con polvo OFI, T.I. mayor a 5000 UNT.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Najib N. et al. (2020) en cambio, optó por una mayor cantidad del mismo eluyente, 1 litro, agregando 8 gr. de mucílago en polvo, preparó la solución extrayente a 8 M de concentración, la mezcla rápida es muy similar a la empleada por Vishali S. & Karthikeyan R. (2014) mas no la mezcla lenta y sedimentación (180 min.). La variación de velocidades utilizadas en las mezclas no fueron la causa principal de la diferencia de resultados, sin embargo, la frecuencia óptima basada en los estudios anteriores propone promover la unión entre flóculos en un rango de 30 - 40 rpm. Vishali S. & Karthikeyan R. (2014) excede 2 veces dicho número, además de contar con un tiempo de sedimentación 3 veces menor (60 min.). Adicionalmente, reafirma que la actividad de coagulación se debe al mecanismo de formación de puentes de polímero, durante el proceso de coagulación, este polímero aniónico proporciona varios sitios activos disponibles para la unión de la superficie de las partículas que se encuentran en la solución.

El punto de quiebre entre los resultados de eficiencia de los autores tiene explicación en la metodología de Kazi T. & Virupakshi A. (2013), la cual no cuenta con un proceso de extracción del polvo obtenido anteriormente, lo que perjudica la reducción de turbidez, esto puede deberse al aumento de la carga orgánica en la muestra con el material OFI que contiene principalmente componentes orgánicos.

El ácido poligalacturónico y otras sustancias orgánicas poliméricas, principales constituyentes de la especie, conducen al aumento del número de metabolitos orgánicos. Además de utilizar una dosis de 0.2 gr /500ml, tanto la cantidad coagulante natural, como el volumen del medio disolvente se encuentran muy por debajo del promedio optado por los demás investigadores con resultados eficientes.

- **Remoción de turbidez con mucílago en solución acuosa**

El mucílago en su forma acuosa también se ha utilizado para la remoción de turbidez, obteniendo resultados más estables, de la *figura 13*, se puede observar un rango de eficiencia de 76% a 99.2%, teniendo como autor de los resultados menos efectivos a Al - aubadi I. & Hashim L. (2015), quién realizó la extracción con etanol al 96% en una proporción (1:1) para separar el mucílago, el cuál separó y secó y trituro para obtener el producto final. Para la aplicación, disolvió 1 g de mucílago en una pequeña cantidad de agua destilada. El rendimiento del producto obtenido se debe a la baja dosis, 30 mg/L, utilizada, para tratar aguas sintéticas, ya que las velocidades de mezcla se encuentran muy cerca de los demás autores con mayor eficiencia.

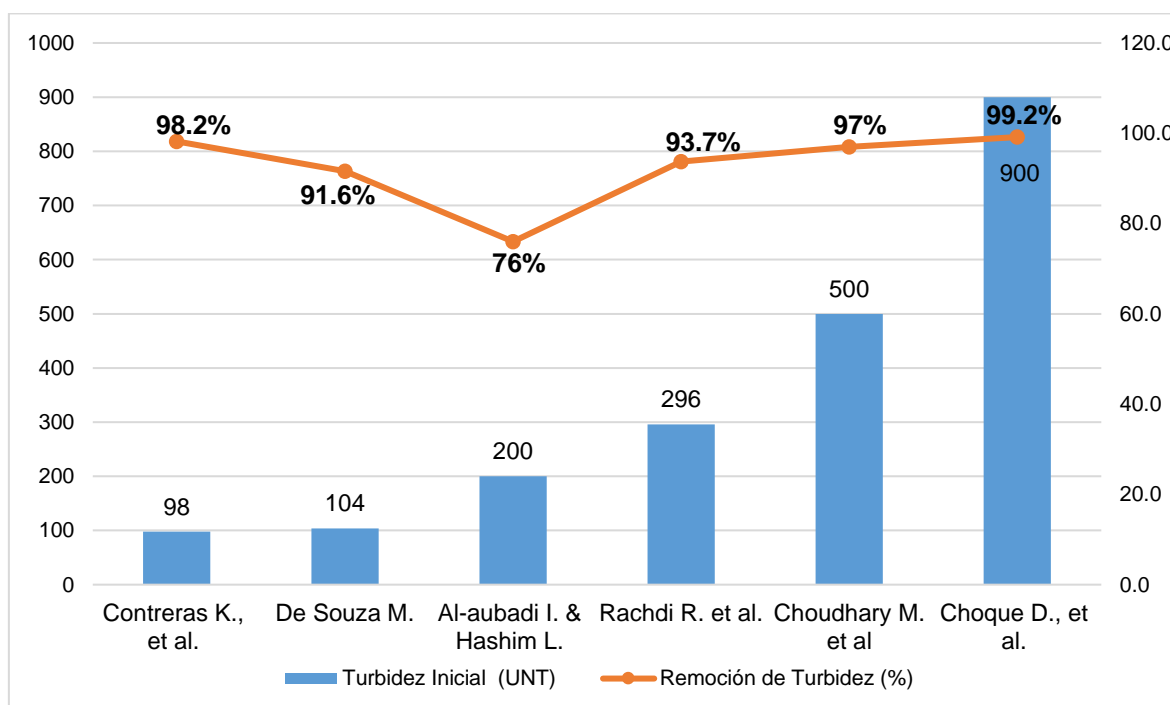


Figura 13. Remoción de turbidez con mucílago en solución acuosa.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Los mejores resultados alcanzados fueron por parte de Choque D., et al. (2018) con un 99.2%, esto se debe a que junto con los 75 mg/L de dosis OFI, aplicó 25 mg/L de FeCl_3 al 1%, como aditamento químico, que, al emplearse, no necesita la rigurosidad de procedimientos para la obtención del mucílago, ni las variaciones de velocidades de mezcla, puesto que sólo bastó con 15 s. y 5 min. de sedimentación, también se debe considerar que el agua tratar fue producida en laboratorio, es decir, no presenta variedad de contaminantes además del caolín.

También se debe señalar que el autor realizó la extracción con etanol 96% pero esta vez en mayor relación, 1 de zumo: 2 de eluyente, lo que podría mejorar la extracción de componentes activos del hidrocoloide.

Contreras K., et al. (2013), adicionó a su procedimiento, un secado y centrifugación, también empleó etanol 96% en el sobrenadante, pero en una relación 2 veces mayor (1:4). A diferencia de Choque D., et al. (2018), no utiliza FeCl_3 como aditamento químico como su similar, si no, que de los 40 mg/L de dosis aplicada, el 90% (36 mg/L) es comprendido por $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, complementado con un 10% (4 mg/L) del biocoagulante. A pesar de la gran diferencia de velocidades y tiempo de mezcla para la aplicación, Contreras K., et al. (2013), es superado por 1% de remoción de turbidez, esto tiene origen principalmente en el aditamento químico utilizado, demostrando mayor eficiencia el cloruro de hierro sobre el sulfato de aluminio. Además de utilizar menor concentración de biocoagulante frente a su similar. También se puede deducir que, para este caso, la centrifugación no fue necesaria, puesto que ya se está utilizando coadyuvante químico capaz de remover la fibra residual que el proceso de extracción pudiera dejar. Así como que el aumento del eluyente a 4 veces su volumen, no mejoran el nivel de eficiencia del coagulante natural y que podría haber afectado negativamente en el proceso de extracción.

La diferencia de porcentaje entre Rachdi R. et al. (2017) y Choudhary M. et al. (2018) reside en el proceso posterior a la trituración, mientras que el primero utiliza un filtrado para separar la fibra, Choudhary M. et al. (2018) opta por el centrifugado a 3700 rpm por 15 min. lo que aumenta ligeramente la eficiencia de los 15 gr/L de biocoagulante, proporcionando 97.5% de efectividad en agua sintética sin pretratamiento, sosteniendo de esta manera que se puede sustituir el

pretratamiento con etanol realizando una centrifugación previa para una extracción más eficiente del mucílago. Rachdi R. et al. (2017) con una dosis remotamente menor de 5 mg/L y velocidades de mezcla estándares logró acercarse a su similar, sin embargo, se debe considerar que son aguas municipales, que en comparación los efluentes de arenas petrolíferas, poseen menor variedad y baja concentración de contaminantes altamente tóxicos.

Además, Choudhary M. et al. (2018), antes de tratar las muestras de agua, almacenó el biocoagulante preparado a 4 °C durante 60 días y sostiene que mantener su eficacia superior al 90% hasta 5 días, y más del 85% hasta 15 días si se almacena bajo estas condiciones.

A partir del sustrato obtenido, De Souza M., (2014) agregó 1.0 g del mucílago OFI congelado a 100 ml. de cloruro de sodio – NaCl (1 M), para posteriormente filtrar la solución. Para la aplicación en prueba de jarras, aumentó la concentración del coadyuvante químico, FeCl_3 , a 160 mg/l, y redujo la del biocoagulante natural a 2.6 mg/L en busca de una mayor efectividad, logró reducir el 91.6% de turbidez inicial, un valor nada despreciable por la razón que interactuó en un medio con una concentración de contaminantes mayor, en comparación con Contreras K., et al. (2013) y Choque D., et al. (2018) que reaccionaron en medios menos tóxicos. Sin embargo, al utilizar una alta concentración de coagulante químico la descarta como un procedimiento saludable para el ambiente y el ser humano.

- Remoción de STD con mucílago en solución acuosa y polvo

En cuanto a la remoción de sólidos totales disueltos, la *figura 14* muestra un mejor resultado para Contreras K., et al. (2013) con 99% de eficacia, esto se debe criterios como la metodología utilizada para la obtención del material OFI en solución acuosa, específicamente el proceso de centrifugación, junto con el etanol 96% en relación 1/4 como eluyente, pero principalmente a los 36 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, como coadyuvante. Demostrando así, que es una eficaz alternativa para la remoción de STD en agua superficiales. Sin embargo, utiliza en mayor parte un coagulante químico, lo que lo descalifica como un proceso saludable para la reducción de STD.

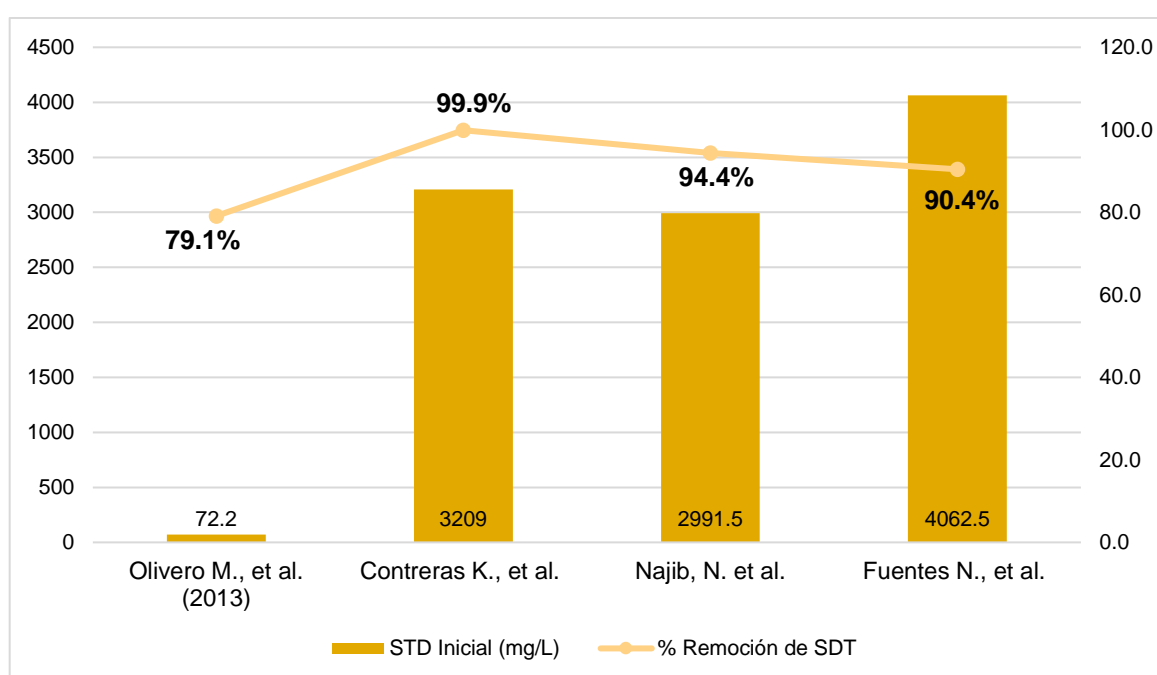


Figura 14. Remoción de STD con mucílago en solución acuosa y polvo.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Por otro lado, Olivero R. (2013) utilizó los mismos procedimientos para obtener el mucílago, pero esta vez en polvo, la varianza se encuentra en el orden de los pasos, un criterio no significativo. Con etanol 96% en una proporción desconocida como eluyente, el autor no utiliza un agente químico para ayudar al proceso de coagulación, ni velocidad para promover los flóculos, al adicionar 40 mg/L del biocoagulante.

La metodología podría mejorar sus resultados si se adiciona una mezcla lenta en un rango de frecuencia de 30 - 40 rpm., además de ello, el tiempo de sedimentación se prolongó a 60 min. un factor que claramente influye en la capacidad de remoción del biocoagulante.

Adicionalmente, la proporción de etanol 96% también pudo influenciar en los resultados del agua superficial tratada, pero se necesitarían más datos para la corroboración de dicha hipótesis.

Najib N. et al. (2020) en cambio, omite el proceso de centrifugación, con sólo 8 gr. del material OFI en polvo extraído con 1 litro de NaCl, obtuvo un 94.4% de efectividad. Si bien obtiene un porcentaje ligeramente menor a la máxima remoción, no utilizó un aditamento químico, lo que vuelve un procedimiento más inocuo y adecuado para aguas industriales como son los efluentes de planta de aceite de palma. Se debe tener en cuenta también, que se empleó un tiempo 3 veces mayor para sedimentar los sólidos totales.

Al igual que Najib N. et al. (2020), Fuentes N., et al. (2016), utilizó el mismo procedimiento para remover STD de aguas superficiales, lo que desiguala es que utilizó agua como extractante, que como ya se ha mencionado, no es el solvente más adecuado para el objetivo dispuesto, lo que provoca que el autor aumente la dosis a 100 gramos en un litro de agua, y la tercera parte de tiempo de sedimentación, 30 min. Pudiendo demostrar así, que el cloruro de sodio es más eficaz que el agua para la extracción de pigmentos clorofílicos.

- Remoción de color con mucílago en solución acuosa y polvo OFI.

Respecto a la remoción de color, nuevamente Contreras K., et al. (2013) obtiene la máxima remoción, pero como se ha comentado anteriormente no es una alternativa inocua para el tratamiento de aguas. Mientras que Vishali S. & Karthikeyan R. (2014) redujo el color de agua sintética hasta un 88.4% con una dosis de 3 gr/L con NaCl como solución.

Para este parámetro se obtuvieron los resultados más variables y menos eficaces, mostrados en la figura 15, según los resultados analizados se puede sostener que la cactácea, no tiene como una de sus fortalezas a la competente remoción de este parámetro. Sin embargo, se pueden mejorar, variando los criterios o factores del tratamiento, como son Fuentes N., et al. (2016) y Villavona Á., et al. (2013) En el proceso de extracción se debe optar por la solución salina NaCl, por la razón que mostró mejores resultados luego de su utilización para eliminar los pigmentos del mucílago, así como incrementar la dosis de 3 gr/L para una mayor efectividad del proceso.

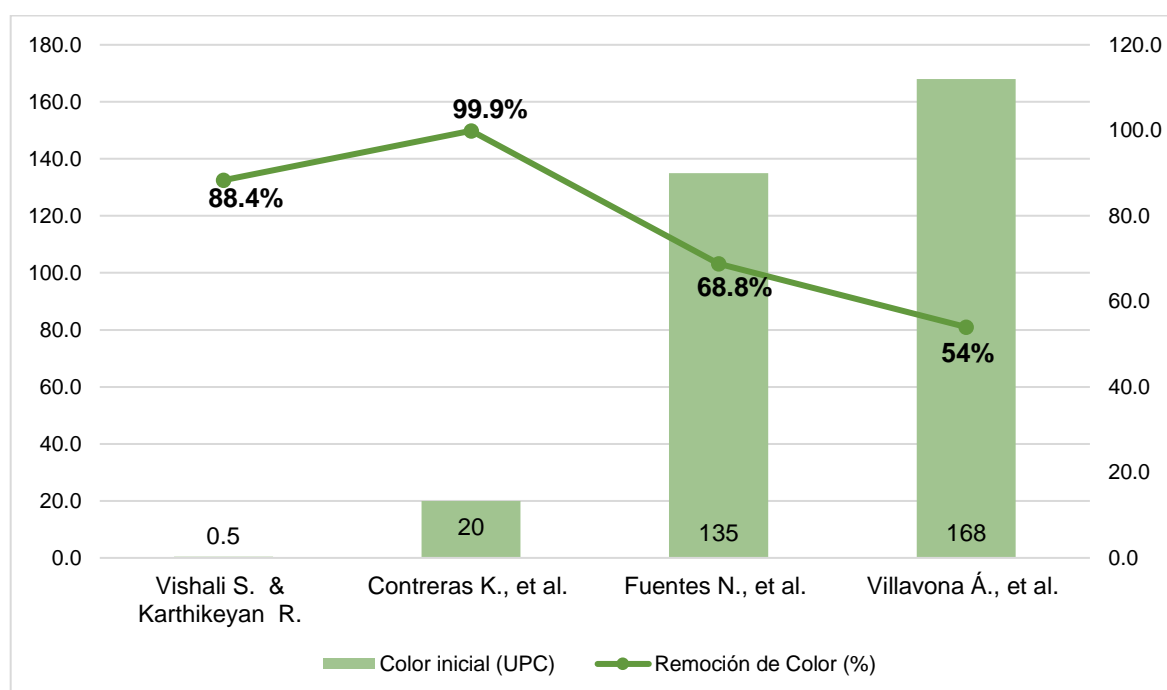


Figura 15. Remoción de color con mucílago en solución acuosa y polvo OFI.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

En el caso de Fuentes N., et al., 2016 el tiempo de sedimentación se debe prolongar a 60 min. como mínimo para progresar los resultados. Por último, es importante tener en cuenta que el proceso de clarificación es una de las primeras etapas implementadas durante el tratamiento del agua, y los valores iniciales puede reducirse a los parámetros en posibles etapas posteriores.

- **Remoción de DQO con mucílago en polvo.**

Los resultados para la remoción de la demanda química de oxígeno se expresan en la *figura 16*, la cual señala que el mucílago en polvo obtiene mejores resultados frente a su forma acuosa, no obstante, existen factores que influyen en los valores obtenidos (Najib N. et al. 2020).

El porcentaje inferior del gráfico del autor Vaca M., et al., (2014) señala un 37.9% de remoción en efluentes de drenaje, el cual se explica principalmente en tres aspectos, siendo aguas no sintéticas, se debe emplear un nivel como mínimo de 3 gr/L, que frente a los 70 mg/L, implican en gran medida la eficacia del biocoagulante. Así como la ausencia de pretratamiento del mucílago y la mezcla lenta para la promover la unión de flóculos.

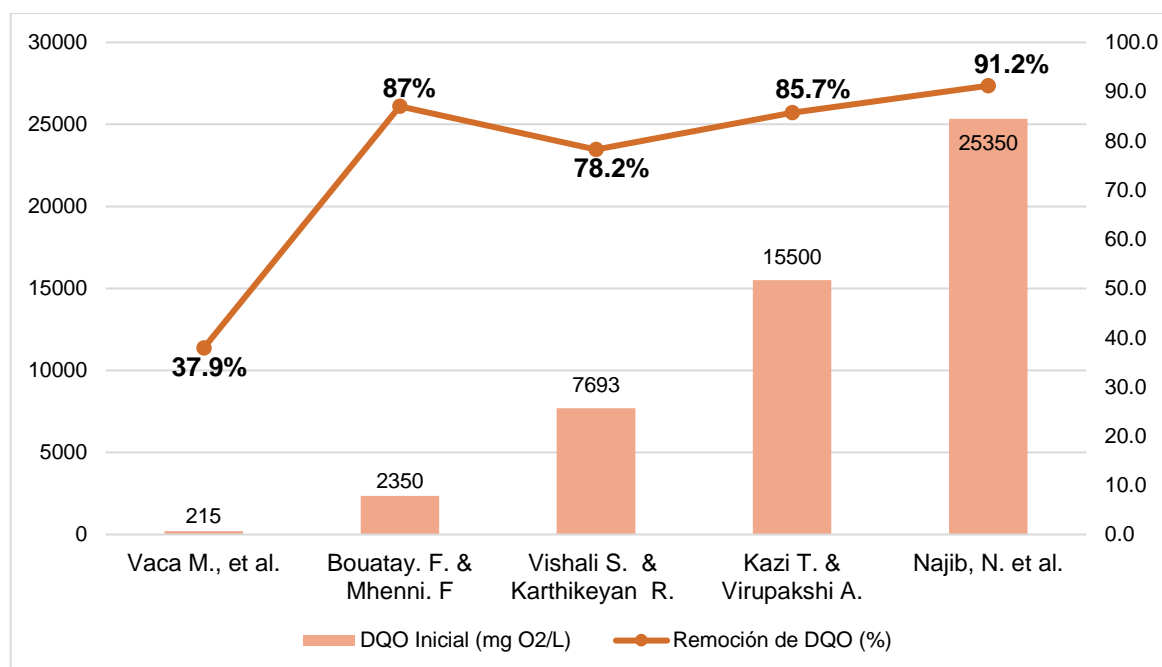


Figura 16. Remoción de DQO con mucílago en polvo.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Con resultados similares, Bouatay. F. & Mhenni. F. (2014) y Kazi T. & Virupakshi A. (2013) con y 87 % y 85.7 % respectivamente, está cerca de la máxima eficiencia alcanzada por Najib N. et al. (2020), sin embargo, esta ligera diferencia se pronuncia debido al empleo de 3 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como coadyuvante químico por parte de Bouatay. F. & Mhenni. F., (2014) cifra que puede ser alcanzada por la dosis de 0.2 gr / 500 ml exclusivamente de biocoagulante OFI y superada en condiciones óptimas agregando una extracción de pigmentos en el pretratamiento.

Por otro lado, Vishali S. & Karthikeyan R. (2014) agregó una mayor concentración de biocoagulante OFI para tratar aguas sintéticas, con un incremento de dosis, se esperaría una mayor efectividad, por lo contrario, obtiene un nivel inferior de reducción de DQO, esto demuestra que para aguas sintéticas una dosis altamente concentrada desfavorece el biotratamiento.

- **Remoción de DQO con mucílago en solución acuosa.**

En cuanto al mucílago en solución acuosa, estos se presentan en resultados dentro de un rango de 64 - 65 % expresados en la *figura 17*.

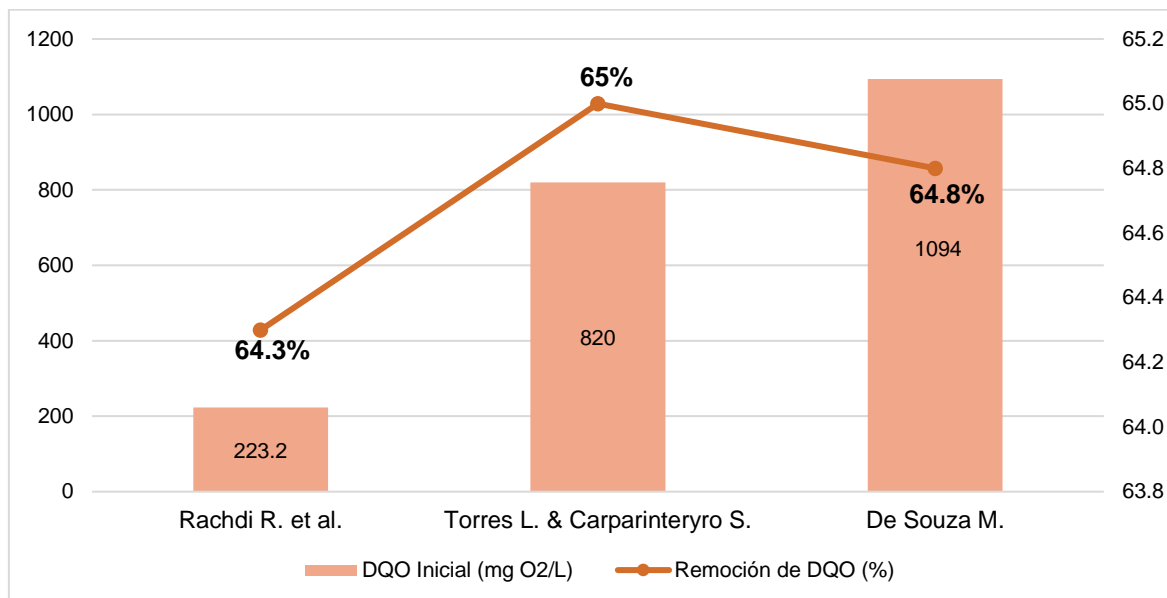


Figura 17. Remoción de DQO con mucílago en solución acuosa.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Tanto De Souza M. (2014) como Rachdi R. et al., (2017) utilizaron químicos para mejorar el proceso de coagulación en diferentes concentraciones, junto con una pequeña dosis de mucílago OFI de 2.5 a 6 mg/L, sin embargo, estos no ayudaron a cumplir el objetivo propuesto por los autores.

De lo anteriormente analizado se puede resaltar que la concentración extractante, 1 gr para 100 ml NaCl, usado por De Souza M. (2014) tampoco generó la mejora del proceso puesto que no es suficiente para extraer todos los componentes activos de la especie. Torres, L. & Carparinteryro S. (2010) sin coadyuvantes químicos alcanzó y superó ligeramente la remoción de DQO, sosteniendo que los químicos no mejoran la efectividad de la especie. No obstante, la DQO retenida sigue siendo un valor preocupante por reducir.

- pH:

Un parámetro también a tener muy en cuenta es el pH del agua a tratar, para la remoción de turbidez se puede observar que el biocoagulante comienza a surtir efecto desde un nivel ácido (5.0), ascendiendo ligeramente hasta niveles neutros (7.0), para finalmente reducir la efectividad entrando a niveles básicos de pH (8.0). Ver figura 18.

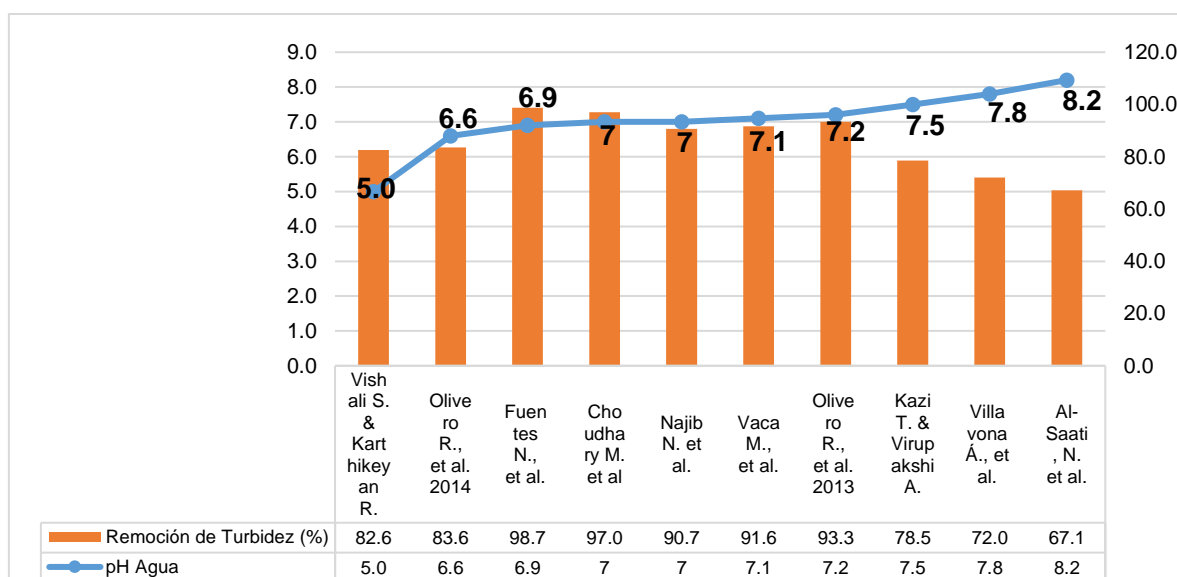


Figura 18. Efecto del pH sobre la remoción de turbidez.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

La explicación se encuentra en los grupos funcionales presentes en el ácido galacturónico, como el ion -COOH- , -OH- , los cuales mejoran la capacidad de coagulación. Estos grupos funcionan óptimamente en presencia de iones con carga positiva, es decir, en la región ácida (Vishali, S. & Karthikeyan, R. 2014).

Tal y como argumentan Jadhav & Mahajan, (2013); Omer et al., (2013), el grupo carboxilo se disuelve parcialmente y genera los sitios de adsorción química para la unión de partículas coloidales. La cantidad de sitios de adsorción disponibles en el ácido poligalacturónico se ve afectado por la concentración de -OH- presente en la solución.

A partir de los resultados, se encontró que el pH neutro era el sugerido para el tratamiento, sin embargo, si se posee un agua residual ácida hasta de 5 pH, no sería necesario aplicar un regulador como NaOH, puesto que se pueden alcanzar mejores resultados si se cumplen con los criterios de extracción y aplicación para optimizar la remoción (Najib, N. et al. 2020).

En las investigaciones se ajustó el entorno de pH de las aguas pretratadas entre 5 y 10, de ello se puede observar una reacción reversible, es decir, entre más alcalina se encuentre el efluente, menos eficaz será el biocoagulante, lo que sustenta nuevamente, que la cantidad de los sitios activos en la cadena galacturónica polimérica se ve afectada por el entorno de pH (Deloya A., 2016).

Cuando el valor de pH disminuye, la solución se vuelve más ácida con el aumento de la concentración de OH⁻, lo que permite que el grupo carboxilo forme moléculas de agua y muestre más sitios activos disponibles de COO⁻ para la adsorción de la cadena poligalacturónica en las partículas coloidales (Villavona Á., et al., 2014), tal y como se muestra en la figura 19.

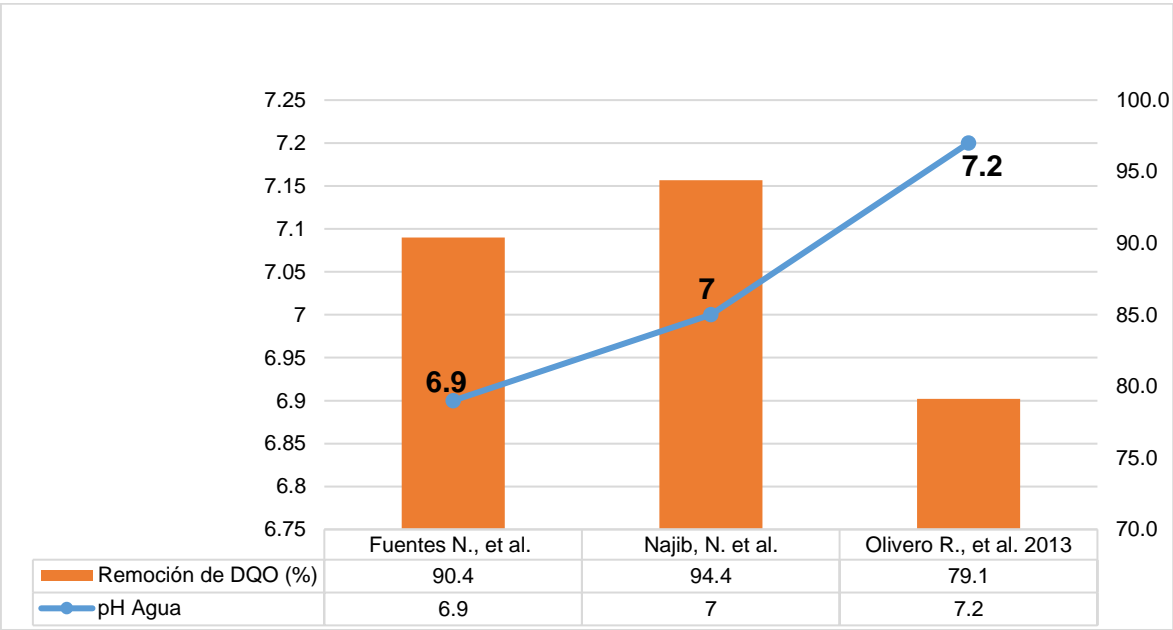


Figura 19. Efecto del pH sobre la remoción de STD.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

El desempeño del proceso de coagulación entre pH 6.9 y pH 7.2 para la remoción de STD propone que la especie OFI funciona mejor dentro del rango de pH neutro, sin embargo, existe disparidad entre los resultados, en el caso de Fuentes N., et al. (2016), provocados por el solvente extractor ineficiente (agua), mientras que, para Olivero M., et al. (2013) la dosis de 40 mg/L redujo su porcentaje de eficacia a un 79%, ambos autores trabajaron en aguas superficiales.

La eficiencia de remoción de STD y turbidez tuvieron una tendencia similar, mostrando a un pH neutro resultados más estables, sin embargo, como ya se ha mencionado se puede prescindir de un regulador al contar con los altos rendimientos de la cactácea en medios ácidos, lo contrario a un medio básico en el que las partículas coloidales (predominantemente con cargas negativas) provocan el efecto de repulsión entre los polielectrolitos aniónicos y las partículas coloidales, dando paso a que las partículas suspendidas no se adhieran a la cadena poligalacturónica y el polímero finalmente se doblará sobre sí mismo. En este caso, no es posible formar puentes de polímero, por lo que la eficiencia de eliminación de TSS y turbidez disminuye (Najib N. et al., 2020).

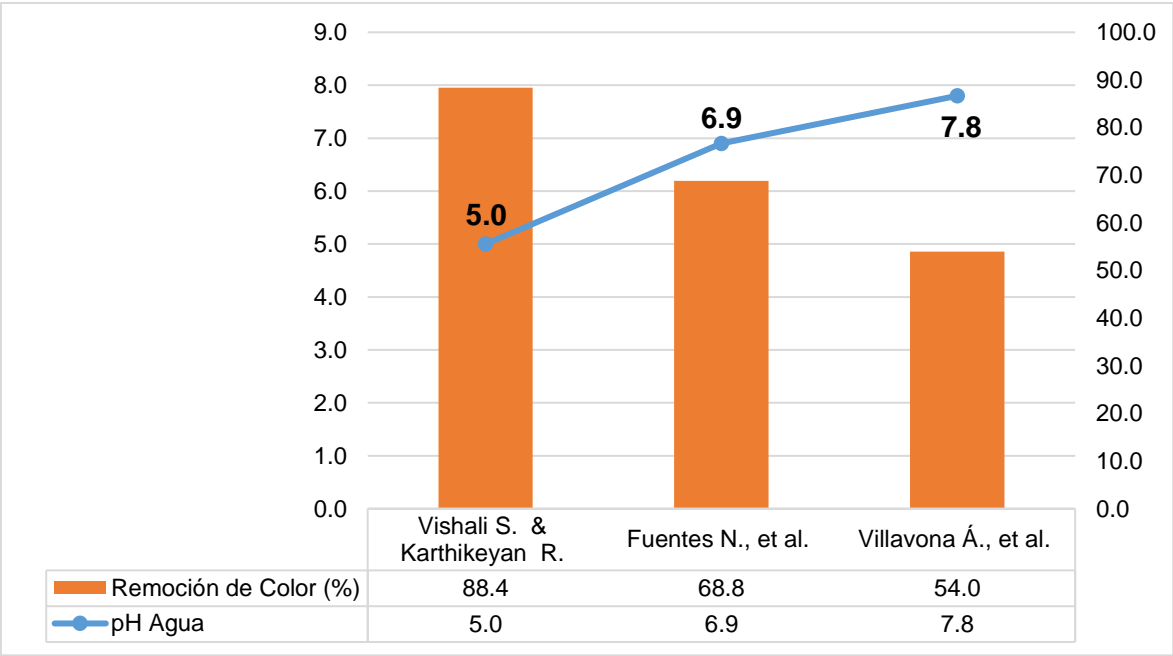


Figura 20. Efecto del pH sobre la remoción de color.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

En cuanto al efecto sobre la remoción de color, en la figura 20 se puede percibir notablemente el impacto que trae consigo la relación entre pH y la eficiencia de biocoagulante. Tratando aguas ácidas con un pH de 5, Vishali S. & Karthikeyan R., (2014) obtuvo un eficiente resultado muy cercano al 90% sobre un casi 60% de Villavona Á., et al. (2013), con aguas levemente alcalinas.

Con un aumento del valor de pH en las muestras, se observa también una caída en el rendimiento de eliminación de DQO. Esto se debió al aumento en la concentración de OH⁻ iones, estos causaron competencia con moléculas orgánicas de las aguas residuales para el proceso de adsorción, que como resultado reduce la eficiencia de remoción de DQO (Subhash B. 2007).

El efecto del pH sobre la remoción de la demanda química de oxígeno, en la figura 21, se establece en un rango de 80% - 90% aproximadamente a excepción de Vaca M., et al. (2014) que, aunque trabajó con un pH neutro, no obtuvo resultados en tendencia a sus similares, esto tiene origen en los demás criterios que se utilizaron para la aplicación del biocoagulante, en este caso, a la baja concentración de la dosis atribuida (70 mg/L) para aguas no sintéticas.

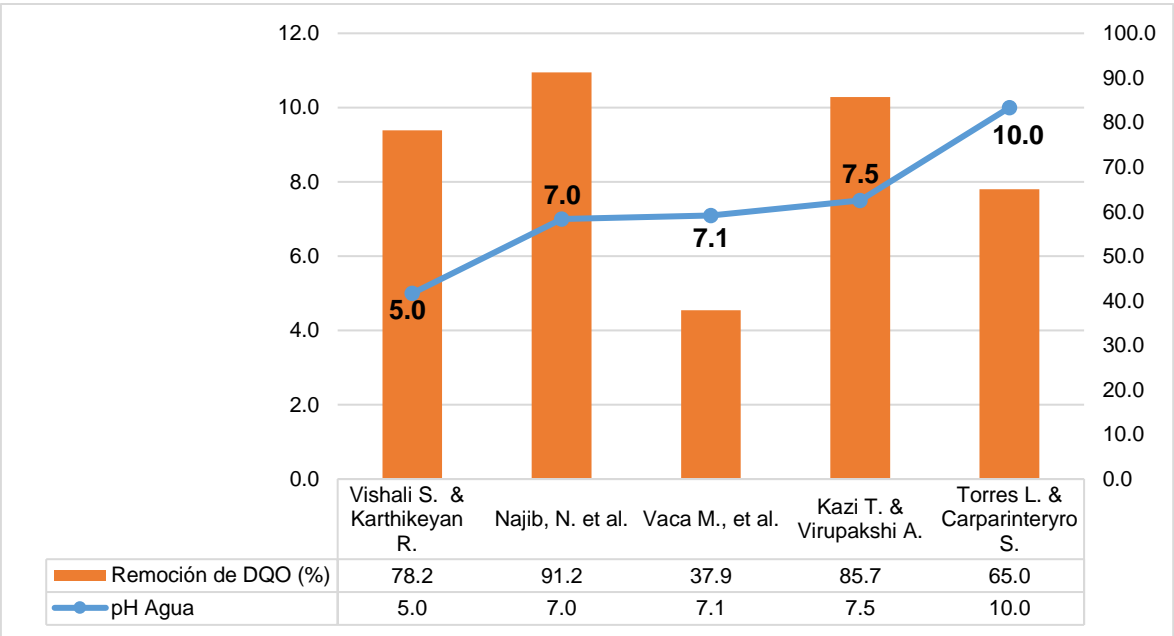


Figura 21. Efecto del pH sobre la remoción de DQO.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

De la misma forma Vishali S. & Karthikeyan R. (2014) con 3 gr/L incrementó el efecto de remoción, sin embargo, ambos autores son inferiores respecto a Najib N. et al. (2020) quién con 8 gr/L alcanzó el máximo resultado de eficacia. La creciente eficiencia del tratamiento sugiere que el incremento de la dosis de coagulante mejora el proceso de coagulación - floculación, ya que de esta manera proporciona suficientes sitios de adsorción para la adsorción de cadenas poligalacturónicas en las partículas coloidales para formar puentes de polímero (Tchobanoglous, G., 2014). También se puede comentar respecto a la alteración de pH que tuvieron las aguas luego de ser tratadas sin coadyuvante químico, la cual se establece en un rango de -0.4 a 0.4 unidades de pH expresado en el anexo 8, sosteniendo así que el tratamiento de aguas con biocoagulante proveniente de la especie *Opuntia ficus - indica*, no producen cambios significativos a dicho parámetro, un criterio más a su favor para su empleo a nivel industrial.

Finalmente, de acuerdo a lo recogido en las investigaciones se puede proponer una serie de procedimientos para generar una metodología eficiente para el tratamiento de aguas, ver la figura 22.

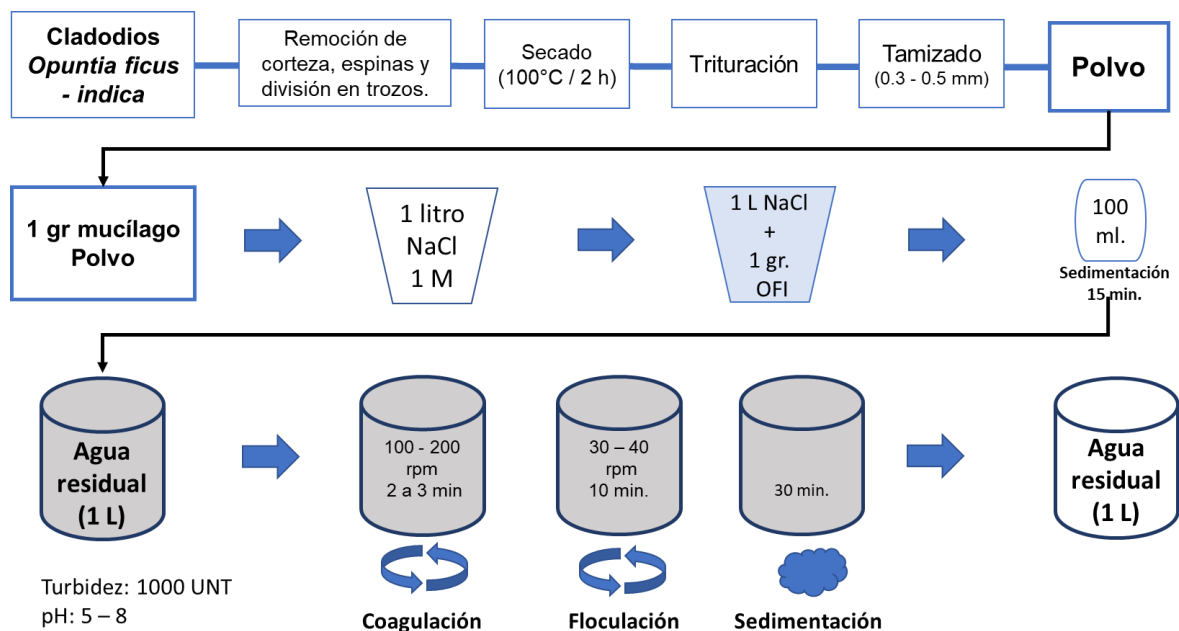


Figura 22. Metodología eficiente de tratamiento de aguas con mucilago OFI.

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

La metodología comienza con la extracción de mucílago en polvo de los cladodios del nopal, siguiendo los pasos de Choque et. al (2018) con la variante de reducción de tiempo de Vishali S., et al. (2014). Para la activación de componentes activos se requiere agregar 1 gramo del mucílago producido, a 1 litro de NaCl (1 M) para luego de una breve agitación entre 3 - 5 minutos, se deberá extraer los 100 ml del biocoagulante eluido, que luego de su sedimentación por 10 - 15 minutos con el objetivo de reducir el nivel de salinidad del cloruro de sodio, serán empleados para aplicar a 1 litro de agua residual.

El tiempo de sedimentación irá aumentando con la mayor concentración del eluyente. De manera que, para cada 1000 UNT de turbidez (tomado como indicador inicial de concentración de contaminantes en el agua residual), se deberá utilizar 1 gramo de polvo OFI. En cuanto a la relación, gramos de mucílago – concentración de NaCl, es 1:1, es decir, para 8 gramos se requerirá una solución concentrada a 8 M. La aplicación del coagulante natural comprende la coagulación con una frecuencia de 100 - 200 rpm por 2 a 3 min, la formación de flóculos que se genera al disminuir la velocidad hasta 30 - 40 rpm por 10 minutos, y la sedimentación de 30 a 180 minutos dependiendo de la concentración inicial de contaminantes en las aguas.

V. CONCLUSIONES

1. Las principales metodologías para la elaboración del biocoagulante de dividen de acuerdo a la obtención de mucílago, en solución acuosa y polvo. Para la obtención del mucílago en polvo se realiza un secado posterior a la remoción de material no deseable, seguido de una trituración y tamizado, este procedimiento ofrece una mejor opción para ser industrializado debido a su fácil almacenamiento y transporte. Mientras que, para su pretratamiento, el mejor solvente para acelerar la interacción y la solubilidad de las proteínas existentes, es el cloruro de sodio (NaCl).
2. En cuanto a la metodología de aplicación, está dividida en 4 factores como son: Dosis de coagulante, mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, de acuerdo con la tendencia de remoción y dosis para aguas con altos índices de contaminación se puede concluir que por cada 1000 UNT aproximadamente se necesita en promedio una dosis de 1 gr/L de biocoagulante para aguas industriales. A fin de separar la cadena poligalacturónica se requiere de una mezcla rápida en un rango de 100 - 200 rpm por 2 a 3 min. para luego reducir la frecuencia a 30 – 40 rpm por 10 min. y finalmente dejar reposar las aguas en un rango de 30 – 180 min.
3. El rango de efectividad para la remoción de turbidez se encontró entre 78.5 - 90.7% siendo la dosis con desenvolvimiento la de 8 gr/L del biocoagulante. Por parte de los sólidos totales disueltos, las investigaciones establecieron un rango de 72.2 - 94.4%. Para el parámetro de color los estudios no obtuvieron resultados eficaces, sobre todo a las bajas concentraciones de biocoagulante, mientras que los resultados de remoción de DQO se hallaron entre 37.9 - 91.2%.
4. Las muestras abarcaron niveles de pH que van desde 5.0 a 10, encontrando mayor eficacia por parte del biocoagulante tanto en medios ácidos como en neutrales, para ir descendiendo con el aumento de la alcalinidad.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda analizar los parámetros microbiológicos y parasitológicos dispuestos en el D.S. 004-2017 - MINAM, la bibliografía indagada señala que la cactácea *Opuntia ficus indica* posee propiedades antibacterianas.
2. Para extender los estudios expuestos en esta tesis se recomienda realizar pruebas piloto empleando el biocoagulante en el proceso de coagulación – floculación para posteriormente llevarlo a uso industrial.
3. Se exhorta finalmente aplicar este tratamiento de aguas a zonas de bajo desarrollo económico como una medida de prevención sanitaria en cuanto al consumo de aguas que tengan alta turbidez.

REFERENCIAS

ABDEL - HAMEED, El - Sayed, [et al.] Phytochemicals, nutritionals and antioxidant properties of two prickly pear Cactus cultivars (*Opuntia ficus - indica*) growing in Taif, KSA. *Food Chem* [En línea]. 2014, vol.160. [Fecha de consulta: 31 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.060>.

AL-SAATI, Nabeel, [et al.] Comparing cactus (*Opuntia spp.*) and alum as coagulants for water treatment at Al-Mashroo Canal: a case study. *International journal of environmental science and technology* [en línea]. 30 de enero 2016, vol. 13, n.º12. [Fecha de consulta 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1114-0> ISSN: 2875-2882.

ANGULO, Paola, [et al.] Nopal (*Opuntia spp.*) y sus efectos sobre el síndrome metabólico: nuevas perspectivas para el uso de una planta milenaria. *Diseño farmacéutico actual* [En línea]. 2019, vol. 25, n.º32. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://www.eurekaselect.com/175558/article>.

ARCILA, Hildebrando y PERALTA, Jhoan. Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* [En línea]. 2016, vol.11 n.º2. [Fecha de consulta: 31 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.18359/rfcb.1303>.

BARKA, Noureddine, [et al.] Dried prickly pear Cactus (*Opuntia ficus - indica*) cladodes as a low - cost and eco - friendly biosorbent for dyes removal from aqueous solutions. *J. Taiwan Inst. Chem* [En línea]. 2013, vol. 44. [Fecha de consulta: 31 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2012.09.007>.

BARRETO, Sebastián, [et al.] Evaluación de coagulantes naturales en la clarificación de aguas. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* [en línea]. 11 de diciembre del 2019, vol. 11, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.3081> ISSN: 2145-6453.

BOLTO, Brian. Polímeros solubles en purificación de agua. *Progress in Polymer Science* [en línea]. 1995, vol. 20, n.º6. [Fecha de consulta: 24 de agosto del 2020]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(95\)00010-D](https://doi.org/10.1016/0079-6700(95)00010-D).

BOUAOUINE, Omar, [et al.] Identification of functional groups of *Opuntia ficus-indica* involved in coagulation process after its active part extraction. *Environmental Science and Pollution Research* [En línea]. 7 de febrero 2018, vol. 25, n.º11. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1394-7>. ISSN: 11111-11119.

BOUATAY, Feriel y MHENNI, Faïda. Use of the cactus cladodes mucilage (*Opuntia Ficus Indica*) as an eco - friendly flocculants: process development and optimization using statistical analysis. *International Journal of Environmental Research* [En línea]. 15 de marzo del 2014, vol. 8, n.º4. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: https://ijer.ut.ac.ir/article_822_15a052324d6b84181184bdd275322bb6.pdf ISSN: 1735-6865.

CÁRDENAS, Adriana; GOYCOOLEA Francisco y RINAUDO Marguerite. On the gelling behaviour of 'nopal' (*Opuntia ficus indica*) low methoxyl pectin. *Carbohydrate Polymers* [En línea]. 2008, vol. 73. [Fecha de consulta: 1 de setiembre del 2020]. Disponible en [doi:10.1016/j.carbpol.2007.11.017](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.11.017) (psu.edu).

CHOQUE, David; [et al.] Capacity flocculant of natural coagulants in water treatment. *RTQ* [En línea]. 2018, vol.38, n.º2. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&nrm=iso ISSN 2224-6185.

CHOUDHARY, Manisha; RAY, Madhumita; y NEOGI, Sudarsan. Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio - coagulant for pre - treatment of oil sands process - affected water. *Separation and Purification Technology* [En línea]. 11 de setiembre del 2018, vol. 209. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.033>.

CHOUGUI, Nadia [et al.] Physicochemical characterization and antioxidant activity of some *Opuntia ficus-indica* varieties grown in northern Algeria. *African Journal of Biotechnology* [En línea]. 2013, vol. 12 n.º3. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.5897/AJB12.1946>

CONTRERAS, Karen, [et al.] El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia* [En línea]. 11 de junio del 2015, vol. 10, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552015000100004&script=sci_abstract&lng=es ISSN: 1909-0455.

CONTRERAS, Margarita, [et al.] Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus - indica*. *J. Biol. Phys* [En línea]. 2015, vol.41. n.º1. [Fecha de consulta: 31 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10867-014-9368-6>.

DE SOUZA, Maísa, [et al.] The use of a natural coagulant (*Opuntia ficus-indica*) in the removal for organic materials of textile effluents. *Environmental monitoring and assessment* [En línea]. 2 de mayo del 2014, vol. 186, n.º8. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3775-9>. ISSN: 5261–5271.

EL - MOSTAFA, Keth., [et al.] Nopal Cactus (*Opuntia ficus - indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules* [En línea]. 2014, vol. 19, n.º9. [Fecha de consulta: 31 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules190914879>.

FERIA, Jairo; RODIÑO, Paola y GUTIERREZ, Enrique. Comportamiento de turbidez, pH, alcalinidad y color en el río Sinú agua cruda tratada por coagulantes naturales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. [En línea] Enero del 2016, n.º78. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302016000100016.

FUENTES, Natalia; MOLINA, Emiro y ARIZA, Carla. Natural coagulants in continuous flow systems as a substitute of $Al_2(SO_4)_3$ for water clarification. *Producción + Limpia* [En línea]. 30 de noviembre del 2016, vol. 11, n.º2. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.22507/pml.v11n2a4>.

GABINO, Rocío. *Opuntia ficus - indica* como coagulante para remoción de sólidos suspendidos totales del efluente de beneficio en la avícola la chacra. Tesis (Ingeniera ambiental). Universidad Continental, Huancayo, Perú. 2018. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCON_f1aae9d6fd4df87f28be580908849901.

GEBRESAMUEL, Naod y GEBRE-MARIAM, Tsige. Comparative physico-chemical characterization of the mucilages of two cactus pears (*Opuntia spp.*) obtained from Mekelle, Northern Ethiopia. *Revista de Biomateriales y Nanobiotecnología* [En línea]. 2012. vol. 3, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4236/jbnb.2012.31010>. ISSN: 2158-7043.

GUPTA, Vinod, [et al.] A critical analysis on the efficiency of activated carbons from low-cost precursors for heavy metals remediation. *Reseñas críticas en Ciencia y Tecnología Ambiental* [En línea] 12 de mayo del 2014, vol. 45, n.º6. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.876526>

GUZMAN, Luis, [et al.] Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* [En línea]. 15 de junio del 2013, vol.16, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262013000100029&lng=en&nrm=iso ISSN: 0123-4226.

HERNÁNDEZ, Margarita; PÉREZ, Esther; y RODRÍGUEZ, Mario. Chemical analysis of nutritional content of prickly pears (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic harvest. *International journal of environmental research and public health* [En línea]. 2011, vol. 8, n.º5. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph8051287>. ISSN: 1287-1295.

JIMÉNEZ, Joaquín; VARGAS, Maricruz y QUIRÓS, Noemí. Estimation of the nopal cactus (*Opuntia cochenillifera*) for color removal in drinking water. *Tecnología en Marcha* [En línea]. Marzo del 2012, vol. 25, n.º4. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/619/545. ISSN: 2215-3241.

Katrivesis, Fox., [et al.] Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. *Journal of Water Process Engineering* [En línea]. 2019, vol. 27. [Fecha de consulta: 22 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.007>.

KAZI, Tasneem y VIRUPAKSHI, Arjun. Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* [En línea]. 2013, vol. 2, n.º8. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020] Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Moa_Megersa/post/Could_anyone_suggest_literature_available_on_Treatment_of_tannery_wastewater/attachment/59d6334ec49f478072ea2189/AS%3A273642062057480%401442252759242/download/natura+tanery.pdf ISSN 2319-8753.

KUMAR, Rajeev y BARAKAT, Maak. Decolourization of hazardous brilliant green from aqueous solution using binary oxidized cactus fruit peel. *Chemical engineering journal* [En línea]. 2013, vol. 226. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.04.063>.

LUGO, José, [et al.] Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande. *Heliyon* [En línea]. 2020, vol. 6, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03062>.

MADERA Tomás, [et al.] Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization. *CyTA-Journal of Food* [En línea]. 2018, vol. 16, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1454988>.

MADHUKAR Jadhav y YOGESH Mahajan Evaluación de la viabilidad de coagulantes naturales en la remoción de turbidez y modelado del proceso de coagulación. *Desalinización y tratamiento de agua* [En línea]. 2014, vol. 52 n.º31. [Fecha de consulta: 22 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2013.816875>.

MARTÍNES, Jasser y GONZÁLES, Enrique. Evaluación del poder coagulante de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. Tesis (Ingeniero Químico). Cartagena: Universidad de Cartagena, 2012. Disponible en: <http://repositorio.unicartagena.edu.co:8080/jspui/bitstream/11227/137/1/EVALUACION%20DEL%20PODER%20COAGULANTE%20DE%20LA%20TUNA%20%28Opuntia%20ficus%20indica%29%20PARA%20LA%20REMOCION%20DE%20TURBIDEZ%20Y%20COLOR%20EN%20AGUAS%20CRUDAS..pdf>.

MEDINA Luis, [et al.] Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture* [En línea]. 2011, vol. 91, n.º6. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.4271>.

MILLER, Sarah, [et al.] Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia spp.* as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental science & technology* [En línea]. 2008, vol. 42, n.º12. [Fecha de consulta: 30 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es7025054>.

MITTAL, Alok, [et al.] Removal and recovery of Chrysoidine from aqueous solutions by waste materials. *J. Colloid Interface Sci.* [En línea]. 2010, vol. 344. [Fecha de consulta: 1 de setiembre del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2010.01.007>.

NAJIB, Nurul, [et al.] Artificial Neural Network (ANN) Modelling of Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment with Natural Bio - coagulants. *Environmental Processes* [En línea]. 2020, vol. 7, n.º2. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00431-w> ISSN: 2600-7762.

NHARINGO, Tichaona; ZIVURAWA M. T. y GUYO, Upenyu. Exploring the use of cactus *Opuntia ficus indica* in the biocoagulation–flocculation of Pb (II) ions from wastewaters. *International journal of environmental science and technology* [En línea]. 2015, vol. 12, n.º12. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-015-0835-9>.

OLIVERO Rafael; MERCADO Iván; y MONTES, Luz. Removing turbidity from Magdalena river by the use of *Opuntia ficus-indica* cactus mucilage. *Producción+Limpia*. [En línea]. 2013, vol. 8, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=134791280&lang=es&site=eds-live>. ISSN: 1909-0455.

OLIVERO, Rafael, [et al.] Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *AVANCES Investigación en Ingeniería* [En línea]. 2014, vol. 11, n.º1. [Fecha de consulta: 12 de setiembre del 2020]. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/302/238> ISSN: 1794-4953

ORTIZ, Ángel; ASTUDILLO, Isabel y GARCÍA, Jasser. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Revista Colombiana de Biotecnología* [En línea]. 2013, vol. 15, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020], Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4776461> ISSN: 1909-8758.

PAIXÃO, Marco, & BALABAN, Rosangela. Application of guar gum in brine clarification and oily water treatment. *International Journal of Biological Macromolecules* [En línea]. 2018, vol. 108. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020], Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.166>

PELÁEZ, Andrew, [et al.] Textile dyes removal from aqueous solution using *Opuntia ficus-indica* fruit waste as adsorbent and its characterization. *Journal of environmental management* [En línea]. 2013, vol. 130. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.059>.

RACHDI, Raouen; SRARFI, Feyda; y SHIMI, Najet. *Cactus Opuntia* as natural flocculant for urban wastewater treatment. *Water Science and Technology*, [En línea]. 2017, vol. 76, n.º7. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.370>

RAZURI, Kriss. Disminución del contenido de la DBO5 y la DQO mediante coagulantes naturales (*Aloe Vera L.* y *Opuntia ficus - indica*) en las aguas del canal de regadío E-8 Chuquitanta – San Martín de Porres. Tesis (Ingeniería ambiental) Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú. 2018. Recuperado de: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3588>.

RODRÍGUEZ, Magdalena., *et al.* Physicochemical characterization of nopal pads (*Opuntia ficus indica*) and dry vacuum nopal powders as a function of the maturation. *Plant Foods for Human Nutrition* [En línea]. 2007, vol. 62, n.º3. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11130-007-0049-5>.

SARAVANAKUMAR, Arthanari, [*et al.*] Comparative antioxidant and antimycobacterial activities of *Opuntia ficus -indica* fruit extracts from summer and rainy seasons. *Frontiers in Life Science* [En línea]. 2015, vol. 8, n.º2. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/21553769.2015.1028655>.

SEPÚLVEDA, Ester; [*et al.*] Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environment* [En línea]. Mayo 2006, vol. 68. [Fecha de consulta: 30 de agosto del 2020]. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120215/Sepulveda_E.pdf?sequence=1.

SUBHASH, Bhatia; ZALINA, Othman; y ABDUL, Ahmad. Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant, *Journal of Hazardous Materials*, [En línea]. 2007, vol. 145. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.003>. ISSN: 0304-3894.

TORRES, Luis y CARPINTEYRO, Sandra. Use of *Prosopis laevigata* seed gum and *Opuntia ficus - indica* mucilage for the treatment of municipal wastewaters by coagulation - flocculation. *Investigación científica*. [En línea]. 2012. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2012.32006>. ISSN: 2158-7086

TRUJILLO, Daniela, [et al.] Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista ION* [En línea]. Junio 2014, vol. 27, n.º3. [Fecha de consulta: 22 de agosto del 2020] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000100003.

VACA Mabel, [et al.] Aplicación del nopal (*Opuntia ficus indica*) como coagulante primario de aguas residuales. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica* [En línea]. 2014, vol. 7, n.º3, [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2014.7.3.46815>. ISSN: 0718 – 378X.

VERBE, Rafael, [et al.] Utilización de Tuna (*Opuntia ficus - indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances: Investigación en Ingeniería* [En línea]. 2014, vol. 11, n.º1. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.302>.

VILLABONA, Ángel; PAZ, Cristina; y MARTÍNEZ, Jasser. Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant. *Colomb. Biotechnol* [En línea]. Julio del 2013, n.º1. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100014.

VISHALI, Solaiappan; y KARTHIKEYAN, R. Cactus *opuntia (ficus-indica)*: an eco - friendly alternative coagulant in the treatment of paint effluent. *Desalination and Water Treatment* [En línea]. 2015, vol. 56, n.º6. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.945487>.

WAN, Jing, [et al.] Treatment train for tailings pond water using *Opuntia ficus-indica* as coagulant. *Separation and Purification Technology* [En línea]. 2019, vol. 211. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.083>.

YOUNG, Kevin. The Mucilage of *Opuntia Ficus - indica*: A Natural, Sustainable, and Viable Water Treatment Technology for Use in Rural Mexico for Reducing Turbidity and Arsenic Contamination in Drinking Water. Tesis (Maestría en Ciencias de Ingeniería Química). Universidad de Sur Florida, 2006. Disponible en: <https://scholarcommons.usf.edu/etd/3832/>.

ZHONG, Xianke, [et al.] Chemical analysis and antioxidant activities in vitro of polysaccharide extracted from *Opuntia ficus-indica* Mill. cultivated in China. *Carbohydr. Polym* [En línea]. 2016, vol. 82 n.º3. [Fecha de consulta: 25 de agosto del 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.042>. 2010.

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Sub categoría	Unidad de análisis	
Recopilar metodologías de las últimas investigaciones para la elaboración de biocoagulante a partir de <i>Opuntia ficus - indica</i> .	¿Cuáles son las principales metodologías para la elaboración y aplicación de biocoagulante a partir de <i>Opuntia ficus - indica</i> ?	Metodologías Aplicadas.	Características de extracción de material OFI	Choque D., et al.	2017
			Pretratamiento de material OFI	Olivero R., et al.	2014
			Método de aplicación de biocoagulante	Olivero M., et al.	2013
				Villavona Á., et al.	2013
Analizar los resultados de la <i>Opuntia ficus - indica</i> como biocoagulante para el tratamiento de aguas residuales.	¿Cuáles son los resultados de la <i>Opuntia ficus - indica</i> como biocoagulante para el tratamiento de aguas residuales?	Resultados obtenidos por los autores.	Remoción de Turbidez	Contreras K., et al.	2013
				Fuentes N., et al.	2016
			Remoción de Sólidos Disueltos Totales	Bouatay. F. & Mhenni. F.	2014
				Vaca M., et al.	2014
			Remoción de DQO	Vishali S. & Karthikeyan R.	2014
				Madhukar V. & Yogesh S.	2014
			Remoción de Color	Ferreira de Souza M.	2014
				Choudhary M. et al	2019
			Efecto de pH	Najib N. et al.	2020
				Shilpa B.	2012
Proponer la metodología más eficiente para el tratamiento de aguas residuales con biocoagulante OFI.	¿Cuál es la metodología más eficiente para el tratamiento de aguas residuales con biocoagulante OFI?	Procedimientos para metodología eficiente.	Extracción de mucílago	Kazi T. & Virupakshi A.	2013
			Pretratamiento de material OFI	Torres, L. & Carparinteryro S.	2013
			Método de aplicación de biocoagulante	Al-Saati, N. et al.	2012
				Rachdi R. et al.	2016
				Al-aubadi I. & Hashim L.	2017
					2015

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 02. Ficha de recolección de datos.

N°	País	Autor	Objetivo	Agua Residual	Pretratamiento	Solvente	Aditamento	Resultado	Fuente	Año
1	Colombia	Choque D., et al.	Evaluar la capacidad de remoción de turbidez de <i>Echinopsis pachanoi</i> , <i>Neoraimondia arequipensis</i> y <i>Opuntia ficus</i> como coagulantes naturales.	Artificial	Extracción Líquido - Líquido	Etanol 96%	Sulfato ferroso FeSO ₄	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 99.15%	Artículo de investigación	2017
2	Colombia	Olivero R., et al.	Evaluar la eficiencia de la tuna <i>Opuntia ficus-indica</i> como coagulante en la clarificación de aguas del río Magdalena.	Río	Extracción Sólido - Líquido	Etanol 96%	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 83.6%	Artículo de investigación	2014
3	Colombia	Olivero R., et al.	Remover la turbidez del agua del río Magdalena utilizando el mucílago del nopal <i>Opuntia ficus-indica</i> .	Río	Extracción Sólido - Líquido	Etanol 96%	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 93.25%	Artículo de investigación	2014
4	Colombia	Villavona Á., et al.	Realizar una revisión bibliográfica acerca del uso de los coagulantes naturales de origen vegetal, utilizados en la remoción de turbidez.	Río	Extracción Sólido - Líquido	Etanol 96%	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 72%	Artículo de investigación	2013
5	Colombia	Contreras K., et al.	Evaluar la eficiencia del mucílago extraído del Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) como coagulante natural complementario al sulfato de aluminio, en el proceso de clarificación de agua.	Río	Extracción Líquido - Líquido	Etanol 96%	Sulfato de Aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 98.2%	Artículo de investigación	2013

6	Colombia	Fuentes N., et al.	Evaluar la eficiencia de los coagulantes naturales Moringa Oleífera, Cactus Opuntia, Algas Marinas y Almidón, para la clarificación de las aguas de consumo humano.	Río	Extracción Sólido - Líquido	Agua destilada	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 98.7% para épocas de lluvia.	Artículo de investigación	2016
7	Túnez	Bouatay. F. & Mhenni. F	Utilizar la <i>Opuntia ficus indica</i> como floculante natural para el tratamiento de aguas residuales industriales.	Industria textil	No utilizó	No utilizó	Sulfato de Aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃	Mayor porcentaje de remoción de color logrado 99.4%	Artículo de investigación	2014
8	México	Vaca M., et al.	Evaluar la efectividad del polvo de <i>Opuntia ficus indica</i> como coagulante primario en el tratamiento de aguas residuales, empleando pruebas de jarras.	Sistema de drenaje	No detalla	No detalla	No utilizó	Mayor porcentaje de reducción de DQO logrado 37.9%	Artículo de investigación	2014
9	India	Vishali S. & Karthikeyan R.	Evaluar la potencialidad de cactus <i>Opuntia ficus-indica</i> , como coagulante para el tratamiento de aguas residuales de piUNTra a base de agua industrial	Sintética	Extracción Sólido - Líquido	Cloruro de sodio (NaCl)	No utilizó	Mayor porcentaje de reducción de DQO logrado 78.2%	Artículo de investigación	2014
10	India	Madhukar V. & Yogesh S.	Investigar el potencial de coagulación / floculación de coagulantes naturales del mucílago de cactus, para eliminar la turbidez del agua turbia sintética.	Sintética	No utilizó	No utilizó	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 94.5%	Artículo de investigación	2014

11	Brasil	De Souza M.	Investigar el uso combinado de coagulante inorgánico, FeCl ₃ , y coagulación asistida con OFI en el tratamiento de efluentes textiles por proceso de coagulación / floculación.	Industria textil	Extracción Líquido-Líquido	Cloruro de potasio (KCl)	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 91.6%	Artículo de investigación	2014
12	Canadá	Choudhary M. et al.	Explorar el rendimiento del biocoagulante OFI extraído en diferentes tipos de agua con turbidez variable.	Proceso de arenas petrolíferas	No utilizó	No utilizó	Sulfato de Aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 97.5%	Artículo de investigación	2019
13	Malasia	Najib, N. et al.	Aplicar cactus <i>Opuntia ficus indica</i> en el proceso de tratamiento POME mediante prueba de jarras	Efluente de la planta de aceite de palma	Extracción Sólido-Líquido	Cloruro de sodio (NaCl)	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 90.7%	Artículo de investigación	2020
14	India	Shilpa B.	Investigar la aplicabilidad de <i>Opuntia ficus indica</i> (Cactus) y <i>Dolichos Lablab</i> (Frijol jacinto) como coagulantes naturales.	Artificial	No utilizó	No utilizó	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 99.7%	Artículo de investigación	2012
15	India	Kazi T. & Virupakshi A.	Reducir la turbidez y la DQO de las aguas residuales de las curtidurías con <i>Cicer arietinum</i> , <i>Moringa oleifera</i> y Cactus	Curtiembre	No utilizó	No utilizó	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 78.54%	Artículo de investigación	2013
16	México	Torres, L. & Carparinteryro S.	Utilizar <i>Prosopis galactomanano</i> y el mucílago de <i>Opuntia ficus</i> para tratar aguas residuales municipales.	Municipal	No utilizó	No utilizó	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de DQO logrado 65%	Artículo de investigación	2012

17	Irak	Al-Saati, N. et al.	Investigar la aplicabilidad de utilizar cactus (<i>Opuntia spp.</i>) como coagulante natural y comparar su capacidad en la cámara de entrada del tanque de sedimentación que entrega agua cruda.	Canal	Extracción Sólido-Líquido	Agua destilada	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 67.1%	Artículo de investigación	2016
18	Túnez	Rachdi R. et al.	Evaluar el potencial como floculante natural de especie la <i>Opuntia ficus-indica</i> (Nopal) junto con el sulfato de aluminio como coagulante.	Municipal	No utilizó	No utilizó	Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 93.7%	Artículo de investigación	2017
19	Irak	Al-aubadi I.	Utilizar el extracto de mucílago de cactus <i>Opuntia</i> como un coagulante principal, a través de la prueba de jarra para tratar tres niveles de agua turbia 53,100 y 200 UNT.	Sintética	Extracción Líquido-Líquido	Etanol 96%	No utilizó	Mayor porcentaje de remoción de turbidez logrado 74%	Artículo de investigación	2015

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 03. Remoción de turbidez con polvo OFI.

Autor	Turbidez inicial (UNT)	Remoción de turbidez (%)	Turbidez final (UNT)
Bouatay. F. & Mhenni. F	38	90.3	3.7
Villavona Á., et al.	171	72.0	47.8
Olivero R., et al.	174	83.6	28.5
Al-aubadi I. & Hashim L.	200	74.0	52.0
Olivero M., et al.	276	93.3	18.5
Madhukar V. & Yogesh S.	314	94.5	17.3
Vaca M., et al.	367	91.6	30.8
Shilpa B.	500	99.7	1.5
Fuentes N., et al.	800	98.7	10.4
Al-Saati, N. et al.	900	67.1	296.1
Vishali S. & Karthikeyan R.	7760	82.6	1350.2
Kazi T. & Virupakshi A.	10000	78.5	2150.0
Najib, N. et al.	16234	90.7	1509.8

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 04. Remoción de turbidez con OFI en solución acuosa.

Autor	Turbidez inicial (UNT)	Remoción de turbidez (%)	Turbidez final (UNT)
Contreras K., et al.	98	98.2	1.8
De Souza M.	104	91.6	8.7
Al-aubadi I. & Hashim L.	200	76.0	48.0
Rachdi R. et al.	296	93.7	18.6
Choudhary M. et al	500	97.0	15.0
Choque D., et al.	900	99.2	7.6

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 05. Remoción de STD con OFI.

Autor	STD inicial (mg/L)	Remoción de SDT (%)	STD final (mg/L)
Olivero M., et al. 2013	72.22	79.1	15.1
Contreras K., et al.	3209	99.9	3.2
Najib, N. et al.	2991.5	94.4	167.5
Fuentes N., et al.	4062.5	90.4	390.0

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 06. Remoción de color con OFI.

Autor	Color inicial (UPC)	Remoción de color (%)
Vishali S. & Karthikeyan R.	0.5	88.4
Contreras K., et al.	20	99.9
Fuentes N., et al.	135	68.8
Villavona Á., et al.	168	54.0
Bouatay. F. & Mhenni. F.	-	99.4

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 07. Remoción de DQO con polvo OFI.

Autor	DQO inicial (mg O₂/L)	Remoción de DQO (%)	DQO final (mg O₂/L)
Vaca M., et al.	215	37.9	133.5
Bouatay. F. & Mhenni. F.	2350	87.0	305.5
Vishali S. & Karthikeyan R.	7693	78.2	1677.1
Kazi T. & Virupakshi A.	15500	85.7	2216.5
Najib, N. et al.	25350	91.2	2230.8

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 08. Remoción de DQO con OFI en solución acuosa.

Autor	DQO Inicial (mg O₂/L)	Remoción de DQO (%)	DQO Final (mg O₂/L)
Rachdi R. et al.	223.15	64.3	79.7
Torres L. & Carparinteryro S.	820	65.0	287.0
De Souza M.	1094	64.8	385.1

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 09. Efecto del pH en la remoción de turbidez.

Autor	pH agua	Remoción de turbidez (%)
Vishali S. & Karthikeyan R.	5.0	82.6
Olivero R., et al. 2014	6.6	83.6
Fuentes N., et al.	6.9	98.7
Choudhary M. et al	7	97.0
Najib N. et al.	7	90.7
Vaca M., et al.	7.1	91.6
Olivero R., et al. 2013	7.2	93.3
Kazi T. & Virupakshi A.	7.5	78.5
Villavona Á., et al.	7.8	72.0
Al-Saati, N. et al.	8.2	67.1

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 10. Efecto del pH en la remoción de STD.

Autor	pH agua	Remoción de STD (%)
Fuentes N., et al.	6.9	90.4
Najib, N. et al.	7	94.4
Olivero R., et al. 2013	7.2	79.1

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 11. Efecto del pH en la remoción de color.

Autor	pH agua	Remoción de color (%)
Vishali S. & Karthikeyan R.	5.0	88.4
Fuentes N., et al.	6.9	68.8
Villavona Á., et al.	7.8	54.0

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 12. Efecto del pH en la remoción de DQO.

Autor	pH Agua	Remoción de DQO (%)
Vishali S. & Karthikeyan R.	5.0	78.2
Najib, N. et al.	7.0	91.2
Vaca M., et al.	7.1	37.9
Kazi T. & Virupakshi A.	7.5	85.7
Torres L. & Carparinteryro S.	10.0	65.0

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.

Anexo 1. Alteración de pH con biocoagulante OFI.

Autor	pH Inicial Agua	Alteración de pH	pH Final Agua	Solvente de extracción
Vishali S. & Karthikeyan R.	7.6	-0.4	7.2	3 N NaCl
Olivero M., et al. 2013	7.2	-0.2	7	Etanol 96%
Olivero R., et al. 2014	6.6	-0.2	6.4	Etanol 96%
Villavona Á., et al.	7.8	-0.1	7.7	Etanol 96%
Fuentes N., et al.	6.9	0.2	7.1	Agua
Vaca M., et al.	7.1	0.4	7.5	No utilizó

Fuente: Elaboración propia en base a revisión bibliográfica.